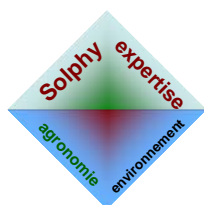




Méthodes de conception de systèmes de production innovants à l'échelle de l'exploitation agricole

Synthèse bibliographique



Sandra NOVAK

Sous la direction de P.-Y. Le Gal, P. Dugué et G. Faure

Octobre 2008

Avant – propos

L'agriculture mondiale se trouve aujourd'hui confrontée à de nombreux enjeux en terme de production, de revenus et d'impacts environnementaux. Ce contexte amène les structures de recherche et de développement agricole ainsi que les producteurs à accorder une attention accrue aux dynamiques d'innovations susceptibles de résoudre les questions soulevées à différentes échelles. De nombreuses initiatives scientifiques sont prises dans le but d'améliorer la production agricole en prenant en compte les exigences du développement durable. On peut citer la réflexion conduite par l'Inra concernant les recherches sur la conception de systèmes agricoles innovants (Meynard *et al.*, 2006) ou l'organisation du symposium *Farming System Design* en septembre 2007 en Italie¹.

L'analyse et l'accompagnement de ces dynamiques d'innovation sont au cœur du projet scientifique de l'Umr Innovation. Ils justifient notamment l'un des axes de l'équipe Spacto (Changements techniques et organisationnelles dans les systèmes de production agricoles) portant sur *l'aide à la conception de systèmes de production innovants à l'échelle de l'exploitation agricole*. Face à la multiplicité des approches développées par différentes équipes de recherche dans le monde sur ce sujet, il nous a semblés utile de réaliser un état de l'art afin de préciser notre positionnement et nos travaux futurs.

Cette étude bibliographique, financée sur les fonds propres de l'Umr, a été confiée à Sandra Novak (Solphy expertise) sous notre direction collective. Elle est fondée essentiellement sur des articles dans les revues scientifiques internationales, facilement accessibles, au détriment d'études d'organismes professionnels et de recherche-développement, sans doute fécondes mais difficile à rassembler et à synthétiser.

Les très nombreuses références collectées nécessitaient d'élaborer un cadre commun d'analyse. Nous avons identifié différentes familles de méthodes de conception de systèmes de production. Certains aspects nous paraissant les plus féconds dans la comparaison des approches ont été privilégiés, particulièrement la participation des acteurs dans le processus de conception, l'accompagnement des acteurs dans la mise en œuvre de systèmes innovants, et la place de la modélisation sous ses différentes formes.

Les choix réalisés, dont on trouvera l'expression dans la structure et le contenu de ce document, soulèvent probablement autant de questions qu'ils n'apportent de réponses. De même les concepts utilisés et leurs définitions sont sources de débats entre les chercheurs travaillant sur le sujet, et fonction du type d'interactions qu'ils entretiennent avec les utilisateurs réels ou potentiels de leurs travaux, que sont les agents du développement ou les producteurs.

Ce document n'a pas pour ambition d'épuiser le sujet ni de le couvrir entièrement, mais bien de nourrir les réflexions qui traversent notre communauté scientifique s'agissant d'un thème encore récent mais plus que jamais d'actualité.

Patrick Dugué, Guy Faure & Pierre-Yves Le Gal

¹ Farming System Design, 2007. Proceedings of an International Symposium on Methodologies for Integrated Analysis of Farm Production Systems. ESA, EMSS, ASA, IFSA, September 10-12 2007, Catania,, Italy.

Sommaire

INTRODUCTION	2
1. Objectifs du travail et champ d'étude	4
2. Matériel et méthodes	5
2.1. Description des procédures de recherche	5
A/ La démarche générale	5
B/ Les éléments de la recherche bibliographique	5
2.2. Supports de publication explorés	7
3. Résultats	8
3.1. Analyse générale de la base de références	8
A/ Distribution des références par pays	8
B/ Distribution des références par année	9
C/ Distribution des références par discipline	9
D/ Distribution des références entre les différents domaines.	10
E/ Distribution par échelle d'étude	14
F/ Distribution par public visé	15
G/ Distribution par « type de préoccupation »	16
H/ Distribution par type d'outil mobilisé	17
3.2. Méthodes de conception	18
A/ Présentation de 5 grandes familles de méthode de conception à partir de 5 cas-type	18
B/ La participation des acteurs dans le processus de conception et dans la modélisation	26
C/ L'accompagnement des acteurs et l'aide à la décision	31
D/ Le degré de formalisation du système	32
3.3. De l'usage des modèles	35
A/ Distribution des références par type de système modélisé	36
B/ Distribution par approche de modélisation	41
C/ Distribution par type d'usage	43
4. Discussion – conclusions	44
REFERENCES	46
ANNEXES	57

INTRODUCTION

Cette étude répond à une commande de l'Equipe SPACTO de l'UMR Innovation du CIRAD, et elle a été réalisée par Sandra NOVAK du bureau de recherche SOLPHY sur la période décembre 2007-mai 2008 sous la supervision de Patrick Dugué, Guy Faure et Pierre-Yves Le Gal. Le contenu de ce rapport n'engage que son auteur.

L'étude a consisté en une recherche bibliographique sur les **méthodes de conception de systèmes de production innovants à l'échelle de l'exploitation agricole**.

Pris dans un sens très large, l'**innovation** peut être considérée comme le résultat de nouvelles combinaisons : « *innovation consists in carrying out new combinations* » écrit Schumpeter en 1934 d'après van Dijk et van Boekel (2001). En agronomie, l'innovation est généralement définie comme un processus qui mobilise une invention et qui aboutit à sa diffusion (Papy, 2004). L'invention répond à un problème nouveau par une activité de conception fondée sur des connaissances scientifiques ou empiriques, souvent la combinaison des deux. Pour devenir une innovation, l'invention nécessite des vecteurs qui peuvent être soit des chercheurs, des vulgarisateurs, des formateurs, ou bien directement des agriculteurs (Dugué *et al.*, 2006). L'innovation est donc un processus qui relève de la volonté des agriculteurs, mais qui peut être influencé par des agents extérieurs, en particulier les agronomes des structures de recherche et de développement.

Nous nous intéresserons ici à l'innovation à caractère 'systémique', c'est-à-dire se traduisant par une restructuration ou une reconfiguration plus ou moins profonde du système de production, et non à l'innovation technologique à caractère segmenté qui ne remet pas en question le fonctionnement de l'exploitation agricole (par ex. variété, machine ou produit de traitement) (voir par exemple Boiffin *et al.*, 2004).

La **conception** peut être définie comme un processus actif, intentionnel, qui vise à générer simultanément des concepts et des connaissances qui déboucheront éventuellement sur de nouveaux produits et de nouvelles technologies (Meynard *et al.*, 2006). La conception fait donc intervenir une volonté explicite de changement, exprimée par l'agriculteur ou par un autre acteur.

Par ailleurs, nous nous plaçons dans cette étude au niveau du **système de production**, qui peut être défini comme un ensemble de ressources et de moyens de production mis en œuvre ensemble, dans le temps et dans l'espace, par un ou plusieurs acteurs, en vue de l'exportation de produits agricoles hors du système (Boiffin *et al.*, 2004). La notion de système de production peut s'appliquer soit aux façons de produire à l'échelle d'une région soit à la combinaison d'activités productives au sein d'une exploitation agricole. Pour notre étude, nous considérerons cette deuxième acception. Le système de production peut être décomposé en trois sous-systèmes (voir par exemple Le Gal *et al.*, soumis) :

- le système biophysique, comprenant les interactions entre les composantes physiques et biologiques du système (comme l'eau, le sol, le climat, les adventices, les insectes nuisibles) et la croissance des plantes ou le développement des animaux ;

- le système technique, défini comme la combinaison des techniques mises en œuvre par le producteur sur le système biophysique, depuis l'échelle de la parcelle ou du troupeau jusqu'à celle de l'exploitation, afin de satisfaire des objectifs de production ;
- le système décisionnel, système de gestion ou de pilotage de l'exploitation, représentant la composante humaine du système.

Ces trois sous-systèmes sont caractérisés par de nombreuses interactions, souvent complexes. La conception de systèmes de production innovants nécessite donc des méthodes dépassant les approches basées sur des expérimentations factorielles, afin de prendre en compte ces multiples interactions.

Nous considérerons ici la phase de conception au sens strict (*i.e.* la génération de nouveaux systèmes de production), mais également les phases qui l'entourent, à savoir la fixation d'un cadre de contraintes et d'objectifs, et l'évaluation des systèmes conçus (*e.g.* Loyce et Wery, 2006). Cette étude porte également sur la **reconception** (*redesign*) de systèmes, qui selon Bellon *et al.* (2007), comporte à la fois une évaluation des situations existantes et des objectifs explicites guidant les changements dans le système de production. Cette approche est fréquente dès lors que l'on cherche à améliorer un système existant et, d'après Hill (2006), la reconception prenant en compte une approche globale du changement est beaucoup plus efficace que les stratégies visant simplement à améliorer l'efficacité d'une technique ou d'un produit (ex : pesticide), ou à les substituer par d'autres techniques ou produits. Cette notion de « *deep design / redesign* », utilisée par Hill (2006) comporte à la fois l'idée d'une rupture avec le système existant, et une volonté de considérer le système de production dans son ensemble. Elle est particulièrement présente dans les approches écosystémiques (*e.g.* Hill, 2006 ; Gliessman, 2006) et holistiques (Savory et Butterfield, 1999).

Cette étude s'intéressera également de très près à la **conception *in silico***, c'est-à-dire à la place de la modélisation dans la conception. Les modèles présentent en effet des avantages indéniables par rapport aux expérimentations classiques d'essai-erreur, surtout à l'échelle de l'exploitation où ces expérimentations sont très lourdes à mettre en place, en terme de temps et de moyen. D'une manière générale, la modélisation est de plus en plus utilisée dans la recherche, à la fois comme moyen d'intégrer et de formaliser les quantités croissantes de connaissances, et comme outil de transfert de la recherche vers le développement (INRA, 2005).

Comme nous le verrons dans la suite de ce rapport et comme le mentionnent Ahuja *et al.*, (2007), la conception de systèmes innovants doit aujourd'hui répondre à des défis multiples, à la fois environnementaux (limitation du transfert des pesticides et des nitrates vers les eaux superficielles et souterraines, conservation du sol, réduction des émissions de gaz à effet de serre, préservation de la biodiversité, ...) et de production alimentaire (sécurisation et augmentation de la production, amélioration de la qualité des produits, adaptation à l'économie, ...), dans une optique de développement durable.

1. Objectifs du travail et champ d'étude

L'objectif de ce travail est de recenser et d'analyser les travaux scientifiques publiés au niveau international, s'inscrivant dans le champ de la conception de systèmes de production innovants, dans une perspective finalisée d'aide à la conception et à leurs mises en œuvre, et en privilégiant les méthodes formalisées de conception, ainsi que les méthodes mobilisant la modélisation.

Ce champ d'étude couvre un ensemble de travaux affichant l'exploitation agricole comme objet ou niveau d'étude, s'inscrivant plus ou moins explicitement dans une perspective de conception de systèmes agricoles innovants, et intégrant une représentation des modalités de fonctionnement biophysique, technique et décisionnel de ces systèmes.

Enfin, comme nous le verrons dans le paragraphe suivant, cette étude s'appuie essentiellement sur des travaux publiés ces 10 dernières années.

2. Matériel et méthodes

2.1. Description des procédures de recherche

A/ La démarche générale

Ce travail a consisté en une analyse bibliographique des articles de revues internationales et des articles de congrès internationaux. Les rapports de recherche (littérature 'grise') et des Instituts Techniques (documents pour les professionnels) ne faisaient pas l'objet de cette étude, notamment en raison du temps imparti.

La recherche bibliographique (précisée ci-dessous) a été réalisée majoritairement à partir de mots clé rentrés dans la base de données bibliographiques « Web of Science » de l'ISI (Institute for scientific Information). Des recherches complémentaires sur mots clé ont également été effectuées dans les bases de données « Agris, Agricola, Cab, Econlit, Francis et Pascal », dans Science Direct, dans « Google Scholar » ainsi que dans la revue « Agricultural System ». Par ailleurs, j'ai utilisé pour certaines références l'outil « suivi de citation » (« *citing article* ») qui permet de retrouver les auteurs ayant cité une référence bibliographique donnée. Enfin, certains auteurs ont fait l'objet d'une recherche sur leur nom, soit pour connaître la totalité de leurs publications, soit parce qu'ils étaient cités par d'autres auteurs, mais n'apparaissaient pas dans les résultats de la recherche, car publiés uniquement dans des congrès internationaux ou dans la littérature grise.

Les références ont été triées en fonction de leur adéquation avec le champ d'étude de ce travail, à partir du titre ou du résumé de la publication. Les publications sélectionnées ont ensuite été exportées vers le logiciel EndNote (références + résumé).

B/ Les éléments de la recherche bibliographique

Mots clé de la recherche bibliographique :

agroecology, conception, decision support system, design, farm, farm management, farming system, framework, holistic approach, innovation, innovative, method, model, participatory, prototyping, redesign, review, system, whole-farm, work management, work organisation.

Noms d'auteur recherchés : Attonaty J.M., Cros M.J., Mc Cown R.L., Maessen R., Pahl-Wostl, Penot E., Savory A., Wilms R.

Bases de données bibliographiques consultées :

- Web of Science : 1993 à février 2008
- Agris, Agricola, Cab, Econlit, Francis et Pascal :
 - Agris : 1991 à février 2008
 - Agricola : 1984 à février 2008
 - CAB : 1972 à février 2008
 - Econlit : 1969 à février 2008
 - Francis : 1995 à février 2008
 - Pascal : 1987 à février 2008
- Science direct : 2007-2008

Procédures de recherches utilisées dans Web of Science : 1993 à février 2008

TS = (prototyp* AND farming system*)

TS = (design AND farming system*)

TS = (farm* AND participatory AND model*)

TS = (farm* AND model* AND review*)

TS = “whole farm” model*

TS = farming system* AND model* AND management

TS = (model* AND ((whole* SAME farm*) OR whole-farm))

TS = (farm* AND participatory* AND design*)

TS = (farm* AND model* AND design* AND system*)

TS = (farm* AND model* AND work management)

TS=(farm* AND model* AND (work SAME organi*ation))

TS = ((decision support system*) AND farm*)

TS = (participatory AND farm* AND innovat*)

TS = (decision* AND (farm* SAME management) AND system*)

TS = multi agent model* AND (farm* OR agri* OR agro*)

TS = agroecology* AND model*

Mots-clé utilisés dans les bases de données Agris, Agricola, Cab, Econlit, Francis et Pascal :

Farming system design

farming system* ET model* ET review*

Procédures de recherches dans Science Direct : pour la période 2007-2008 (= afin d’obtenir les articles sous presse, non présents dans le Web of Science)

TITLE-ABSTR-KEY(farm* AND management*) and TITLE-ABSTR-KEY(decision* OR model* OR design*)

Mots-clé utilisés dans Google Scholar :

Conception agronomie système

Design agronomy system

« farming system design »

Programmation linéaire

Système multi-agents

Enfin, deux mots-clé ont été recherchés successivement dans la revue « Agricultural System » : Innovation puis Design

« Elagage » de la base de données EndNote

La première version de la base de données comportait 668 références. Un premier tri a permis d’éliminer 26 références trop éloignées du domaine d’étude. Puis, un second tri a été opéré pour mettre de côté :

- les références correspondant à des rapports ou à des conférences nationales,
- les références d’articles de congrès internationaux (ex : FSD) dont le texte écrit ne donnait pas assez d’indications sur l’étude effectivement réalisée (ex : Hammer et Jordan, 2007) ou déjà traitées dans un article référencé dans la base,

- les références traitant uniquement de l'adoption ou non d'innovations (base « adoption »),
- les travaux à des échelles trop éloignées de l'exploitation (ex : placette, bassin versant)
- les références décrivant des techniques de modélisation ou un modèle sans exemple d'application (transféré dans base « model »),
- les outils centrés uniquement sur l'aide à la décision (ne parlant pas de conception).
- les études sur la construction ou sur le calcul d'indicateurs au niveau de l'exploitation agricole,
- les études axées sur l'évaluation d'un système agricole, sans aucun lien avec la conception du système,
- les synthèses bibliographiques dont le sujet n'est pas directement celui de notre étude (base « vrac_design »), notamment les travaux sur l'évaluation des systèmes agricoles, la démarche participative, les systèmes multi-agents, les systèmes d'aide à la décision, et les généralités sur les modèles à l'échelle de l'exploitation, ...
- les articles de revue bibliographique présentant plusieurs méthodes de conception ou analyses de cas, déjà mentionnées dans d'autres études présentes dans la base.

A la suite de ce tri, la base obtenue comporte **122 références**. C'est cette base qui fera l'objet des études statistiques. Elle comporte donc des travaux originaux présentant des méthodes de conception appliquées à des études de cas. Dans cette base de données 23 références ont été lues in extenso et 99 parcourues (c'est-à-dire lues plus ou moins rapidement et pas en totalité).

Les méthodes de traitement des références sont indiquées en annexe 1.

2.2. Supports de publication explorés

- Revues internationales : 31 revues (101 références)
- Revues nationales : 8 revues (14 références)
- Communications à congrès internationaux : 5 congrès (6 références)
- Ouvrage : 1 référence correspondant à l'ouvrage de Savory et Butterfield (1999)

Les listes des revues et congrès sont données en annexes 2, 3 et 4.

La 'méthode holistique' proposée par Savory (cf annexe 5) n'ayant pas fait l'objet d'un article scientifique, la référence prise en compte correspond (exceptionnellement) à un livre.

D'autres supports de publication ont été consultés durant cette étude, notamment des thèses, des HDR, des chapitres d'ouvrage ou des articles de synthèse. Mais, comme mentionné précédemment, ils ont été écartés de la base servant à l'analyse statistique. Ils contiennent cependant des éléments de réflexion intéressants dont certains sont cités dans la discussion. (ces références sont présentes dans la base nommée « design »).

A titre indicatif, voici la liste des thèses et HDR consultées :

Andrieu (2004)
 Aubry (2007)
 Dogliotti (2003)
 Guerrin (2007)
 Jouven (2006)
 Sterk (2007)
 Tixier (2004)
 Vayssières (2008)

3. Résultats

3.1. Analyse générale de la base de références

A/ Distribution des références par pays

Voici un aperçu des principales **équipes** qui travaillent sur le sujet, classées par pays (liste indicative non exhaustive) :

Les Australiens : 13 références

CSIRO : P.S. Carberry, R.L. McCown, M.A. Foale, B.A. Keating ...
Université de Sidney : S.B. Hill

Les Britanniques : 12 références

Université d'Edinburgh : M. Herrero
Université de Nottingham : J.M. Gibbons
Université de Reading : D. Val-Arreola

Les Espagnols : 3 références

Université Polytechnique de Madrid : B. Recio

Les Français : 29 références

CEMAGREF :

Clermont-Ferrand : V. Abt
Grenoble : L. Dobremez
Montpellier : F. Labbé, P. Ruelle, P. Garin

CIRAD :

Martinique : Ph. Tixier, M. Dorel
Montpellier : V. Alary, N. Andrieu, P.Y. Le Gal, P. Grimaud, E. Malézieux, E. Penot
Réunion : F. Guerrin, J. Vayssières, P. Lecomte

IAMM : K. Louhichi

INRA :

Avignon : Unité D'Ecodéveloppement : M. Navarette
Clermont-Ferrand : B. Dedieu
Grignon : UMR SADAPT : F. Coleno, C. Aubry, M. Le Bail
UR ESR : J.-M. Attonaty, M.H. Chatelin, P. Leroy
Agronomie : C. Loyce, J.M. Meynard
Mirecourt : X. Coquil
UMR System (Montpellier) : A. Merot, J. Wéry et leurs collaborateurs ...
Toulouse : E&A (J.E. Bergez), UMR Arche (M. Duru), UMR BIA (R. Martin-Clouaire, J.P. Rellier, F. Garcia)

Les Néerlandais : 29 références

Université de Wageningen : M.J. Kropff, W.A.H. Rossing, B. Sterk, G.W.J. Van de Ven H, H. van Keulen, M.K. van Ittersum, P. Vereijken (décédé), ...

Les Américains des USA : 11 références

USDA-ARS : par exemple A.A. Andales, C.A. Rotz : modèle Dafosym puis ISFM,
 J.C. Ascough II (GPFarm),
 College of Agriculture and Home Economics : V.E. Cabrera
 « Centre holistique » de Savory

Les Canadiens : 6 références

Université de Guelph : E. Kebreab

Nova Scotia Agricultural College : E.K. Yridoe

Quelques autres pays :

Allemagne : 5 références

Danemark : 4 références

Nouvelle Zélande : 3 références

Uruguay : 3 références (S. Dogliotti)

Kenya: 3 références (M. Herrero)

B/ Distribution des références par année

La base de données « étude de cas » comporte des références sur la période 1986-2008, et 88% des références ont été publiées entre 1999 et 2007. Cette répartition des références dans le temps résulte vraisemblablement à la fois de la méthode de recherche (la base de donnée Web of Science comportant des références à partir de 1993) et d'un accroissement de la littérature sur ce sujet depuis 1999.

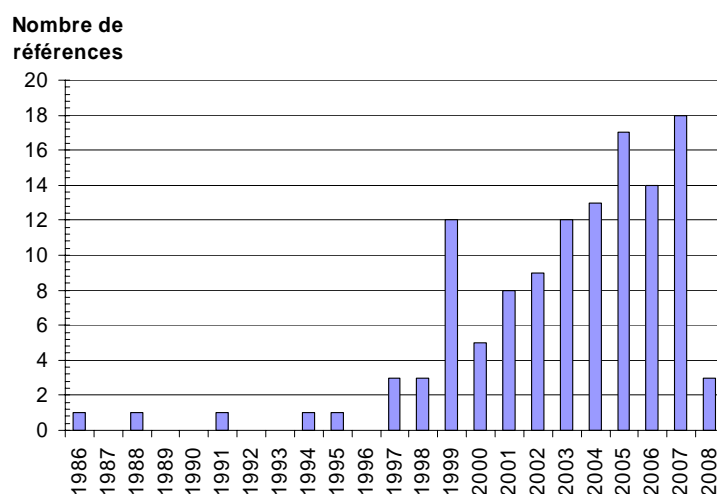


Figure 1 : répartition des références de la base de données « étude de cas » par année de publication.

C/ Distribution des références par discipline

La complexité des systèmes agricoles et la nécessité de répondre à des objectifs multiples pour concevoir des systèmes de production durables, ont conduit plusieurs disciplines à s'intéresser aux systèmes de production agricole (Kropff *et al.*, 2001).

Les **disciplines** concernées par la conception de systèmes de production innovants sont majoritairement l'agronomie (puisque l'accent a été mis dans la recherche bibliographique sur la production agricole), et dans une moindre part la zootechnie (ex : Romera *et al.*, 2004). L'écologie (agro-écologie) est présente dans les travaux considérant les agrosystèmes comme des agro-écosystèmes (ex : Hill *et al.*, 1999). De nombreuses disciplines liées aux sciences de la vie et de la terre sont présentes dans les études visant à évaluer l'effet des nouveaux systèmes conçus sur l'environnement : sciences du sol (ex : Bosma *et al.*, 1999), sciences de l'eau (ex : Cabrera *et al.*, 2007), sciences de l'atmosphère (ex : Weiske *et al.*, 2006). Plusieurs études mobilisent des modèles 'bioéconomiques' (ex : Herrero *et al.*, 1999) basés initialement sur une théorie économique, tandis que les concepts de la microéconomie (marge, rentabilité, ...) sont utilisés par plusieurs auteurs pour évaluer le système conçu (ex : Berntsen *et al.*, 2003).

Parmi les études traitant de l'utilisation de modèles pour la conception, plusieurs discutent d'aspects mathématiques et informatiques, et celles ne comportant que ces aspects ont été écartées de l'étude de cas. La sociologie est souvent présente dans les études employant une démarche participative (ex : Hagmann et Chuma, 2002). Enfin certains travaux ont pris en compte des concepts provenant des sciences de la gestion (« unités de consommation, de production », voir par exemple Coleno et Duru, 2005).

D/ Distribution des références entre les différents domaines.

A partir des références bibliographiques regroupées dans la base de données, 8 domaines d'étude ont été identifiés : organisation du travail, gestion de l'irrigation, conduite d'un système de culture, conduite d'un système d'élevage, gestion des nutriments (N, P, K, effluents), grandes orientations de l'exploitation, problématiques environnementale et risque. Chaque référence a été affectée d'un ou de plusieurs domaines. Il s'agit du ou des **domaine(s) dominant(s)** de l'étude, et non pas d'une liste exhaustive de tous les domaines traités au cours de l'étude.

Tableau 1 : Distribution des références entre les différents domaines et suivant l'échelle d'étude

Echelle Domaine	Parcelle / Troupeau	Composantes techniques de l'exploitation (atelier, sole)	Exploitation	
Organisation du travail		Attonaty <i>et al.</i> , 1991 Aubry <i>et al.</i> , 1998 Dounias <i>et al.</i> , 2002 Madelrieux <i>et al.</i> , 2006 Snow et Lovatt, 2008	Abt <i>et al.</i> , 2005 Aubry <i>et al.</i> , 2006 Guerrin, 2001 Musshoff et Hirschauer, 2007	Recio <i>et al.</i> , 2003 Sanchez-Giron <i>et al.</i> , 2007 Vayssieres <i>et al.</i> , 2007 White <i>et al.</i> , 2005
Gestion de l'irrigation	Bergez <i>et al.</i> , 2004	Bergez <i>et al.</i> , 2001 Labbé <i>et al.</i> , 2000	Alvarez <i>et al.</i> , 2004 Robertson et Wang, 2004	
Conduite d'un système de culture	Ascough <i>et al.</i> , 2007 Bonny <i>et al.</i> , 2005 Carberry <i>et al.</i> , 2002 Cardoso <i>et al.</i> , 2001 Chatelin <i>et al.</i> , 2005 Foale <i>et al.</i> , 2004 Huth <i>et al.</i> , 2002 Loyce <i>et al.</i> , 2002 Robertson <i>et al.</i> , 2000 Stilma <i>et al.</i> , 2007 Tixier <i>et al.</i> , 2008	Aubry <i>et al.</i> , 1998 Seppelt, 1999	Alvarez <i>et al.</i> , 2004 Blazy <i>et al.</i> , 2007 de Buck <i>et al.</i> , 1999 de Koeijer <i>et al.</i> , 1999 Dogliotti <i>et al.</i> , 2004 Dogliotti <i>et al.</i> , 2005 Dogliotti <i>et al.</i> , 2006 Dorward <i>et al.</i> , 2003 Ekman, 2005 Hill <i>et al.</i> , 1999 Lewis et Tzilivakis, 2000	Navarrete et Le Bail, 2007 Penot et Feintrenie, 2005 Recio <i>et al.</i> , 2003 Rossing <i>et al.</i> , 1997 Sanchez-Giron <i>et al.</i> , 2007 Stoorvogel <i>et al.</i> , 2004 Vereijken, 1997
Conduite d'un système d'élevage	Andales <i>et al.</i> , 2006	Barioni <i>et al.</i> , 1999 Cros <i>et al.</i> , 2001 Cros <i>et al.</i> , 2003 Dobos <i>et al.</i> , 2004 Dobos <i>et al.</i> , 2001 Donnelly <i>et al.</i> , 2002 Duru <i>et al.</i> , 2007 Heard <i>et al.</i> , 2004 Kerr <i>et al.</i> , 1999 Meot <i>et al.</i> , 2003 Romera <i>et al.</i> , 2004	Abegaz <i>et al.</i> , 2007 Abt <i>et al.</i> , 2005 Agbonlahor <i>et al.</i> , 2003 Andrieu <i>et al.</i> , 2007 Andrieu <i>et al.</i> , 2007 Buyse <i>et al.</i> , 2005 Cabrera <i>et al.</i> , 2005 Cabrera <i>et al.</i> , 2006 Cabrera <i>et al.</i> , 2007 Castelan-Ortega <i>et al.</i> , 2003 Castelan-Ortega <i>et al.</i> , 2003 Coleno <i>et al.</i> , 2002 Coquil <i>et al.</i> , 2007 Defoer <i>et al.</i> , 1998	Duru et Hubert, 2003 Herrero <i>et al.</i> , 1999 Kassie <i>et al.</i> , 1999 Milne et Sibbald, 1998 Schiere <i>et al.</i> , 1999 Schils <i>et al.</i> , 2005 Shalloo <i>et al.</i> , 2004 Val-Arreola <i>et al.</i> , 2006 Val-Arreola <i>et al.</i> , 2005 Val-Arreola <i>et al.</i> , 2004 van de Ven <i>et al.</i> , 2003 van de Ven et van Keulen, 2007 Vayssières <i>et al.</i> , 2008 Vayssieres <i>et al.</i> , 2007 Veyssset <i>et al.</i> , 2005
Gestion des fertilisants	Carberry <i>et al.</i> , 2002b	Rowe <i>et al.</i> , 2006	Aarts <i>et al.</i> , 2000 Aarts <i>et al.</i> , 2000 Aubry <i>et al.</i> , 2006 Berntsen <i>et al.</i> , 2003 Brown <i>et al.</i> , 2005 Buyse <i>et al.</i> , 2005 Defoer <i>et al.</i> , 1998 Groot <i>et al.</i> , 2006 Groot <i>et al.</i> , 2003	Guerrin, 2001 Hilhorst <i>et al.</i> , 2001 Modin-Edman <i>et al.</i> , 2007 Oenema <i>et al.</i> , 2001 Olesen <i>et al.</i> , 2006 Rotz <i>et al.</i> , 2006 Rotz <i>et al.</i> , 1999 Schils <i>et al.</i> , 2007
Orientations de l'exploitation	Carberry <i>et al.</i> , 2002b Cardoso <i>et al.</i> , 2001 Hagmann et Chuma, 2002 Huth <i>et al.</i> , 2002	Dowle <i>et al.</i> , 1988 Doyle et Edwards, 1986 Gassman <i>et al.</i> , 2006 Kerr <i>et al.</i> , 1999 Sadras <i>et al.</i> , 2003 Sorensen <i>et al.</i> , 2005	Agbonlahor <i>et al.</i> , 2003 Bernet <i>et al.</i> , 2001 Bosma <i>et al.</i> , 1999 Buyse <i>et al.</i> , 2005 Cacho <i>et al.</i> , 1995 Castelan-Ortega <i>et al.</i> , 2003 Castelan-Ortega <i>et al.</i> , 2003 Kassie <i>et al.</i> , 1999 Louhichi <i>et al.</i> , 2004 Penot et Feintrenie, 2005	Pfister <i>et al.</i> , 2005 Savory et Butterfield, 1999 Sharifi et Van Keulen, 1994 Stonehouse <i>et al.</i> , 2002 Torkamani, 2005 Waithaka <i>et al.</i> , 2006 Weiske <i>et al.</i> , 2006 Yiridoe <i>et al.</i> , 2006 Zhong <i>et al.</i> , 2004

Tableau 1 (suite) : distribution des références entre les différents domaines et suivant l'échelle d'étude

Echelle Domaine	Parcelle / Troupeau	Composantes techniques de l'exploitation (atelier, sole)	Exploitation
Problématiques environnementales	Ascough <i>et al.</i> , 2007 Carberry <i>et al.</i> , 2002 Stilma <i>et al.</i> , 2007 Tixier <i>et al.</i> , 2008	Donnelly <i>et al.</i> , 2002 Duru <i>et al.</i> , 2007 Gassman <i>et al.</i> , 2006 Meot <i>et al.</i> , 2003	Aarts <i>et al.</i> , 2000 Aarts <i>et al.</i> , 2000 Abegaz <i>et al.</i> , 2007 Agbonlahor <i>et al.</i> , 2003 Aubry <i>et al.</i> , 2006 Berntsen <i>et al.</i> , 2003 Bloksma et Struik, 2007 Bosma <i>et al.</i> , 1999 Brown <i>et al.</i> , 2005 Cabrera <i>et al.</i> , 2005 Cabrera <i>et al.</i> , 2006 Cabrera <i>et al.</i> , 2007 Coquil <i>et al.</i> , 2007 de Buck <i>et al.</i> , 1999 de Koeijer <i>et al.</i> , 1999 Defoer <i>et al.</i> , 1998 Dogliotti <i>et al.</i> , 2004 Dogliotti <i>et al.</i> , 2005 Dogliotti <i>et al.</i> , 2006 Duru et Hubert, 2003 Ekman, 2005 Gibbons <i>et al.</i> , 2005 Groot <i>et al.</i> , 2003 Groot <i>et al.</i> , 2006 Guerrin, 2001 Hilhorst <i>et al.</i> , 2001 Hill <i>et al.</i> , 1999 Jordan <i>et al.</i> , 1997 Kassie <i>et al.</i> , 1999 Lewis et Tzilivakis, 2000 Oenema <i>et al.</i> , 2001 Olesen <i>et al.</i> , 2006 Rossing <i>et al.</i> , 1997 Rotz <i>et al.</i> , 2006 Savory et Butterfield, 1999 Schils <i>et al.</i> , 2007 Schils <i>et al.</i> , 2005 Stonehouse <i>et al.</i> , 2002 Stoorvogel <i>et al.</i> , 2004 van de Ven <i>et al.</i> , 2003 van de Ven et van Keulen, 2007 Vayssières <i>et al.</i> , 2008 Vereijken, 1997 Waithaka <i>et al.</i> , 2006 Weiske <i>et al.</i> , 2006
Risque	Robertson <i>et al.</i> , 2000	Donnelly <i>et al.</i> , 2002 Duru <i>et al.</i> , 2007 Sadras <i>et al.</i> , 2003	de Buck <i>et al.</i> , 1999 Flaten et Lien, 2007 Muschhoff et Hirschauer, 2007 Penot et Feintrenie, 2005 Robertson et Wang, 2004 Torkamani, 2005

Précisions sur les domaines d'étude et sur les références qu'ils regroupent :

- **Organisation du travail** (13 références) : le nombre d'études dans ce domaine étant relativement limité, j'ai également pris en compte les références pour lesquelles l'organisation du travail n'est pas le thème central de l'étude, mais en représente une partie significative (ex : Aubry *et al.* (2006)). Les références concernent l'organisation du travail dans les exploitations de grandes cultures (Attonaty *et al.*, 1991), dans les exploitations d'élevage (Madelrieux *et al.*, 2006), dans les exploitations laitières (Vayssières *et al.*, 2007), pour la gestion de la sole (Aubry *et al.*, 1998 ; Dounias *et al.*, 2002) ou celle des effluents d'élevage (Guerrin *et al.*, 2001). Abt *et al.* (2005) étudient quant à lui l'organisation du pilotage de la production au sein de l'exploitation à partir de modèles conceptuels considérant l'exploitation comme une entreprise. Les 5 références non françaises (Muschhoff et Hirschauer, 2007; Recio *et al.*, 2003; Sanchez-Giron *et al.*, 2007; Snow et Lovatt, 2008; White *et al.*, 2005) s'intéressent surtout à l'optimisation de l'organisation du travail, par exemple pour mieux gérer les périodes de pointe (White *et al.*, 2005).
- **Gestion de l'irrigation** (5 références) : il s'agit d'études visant à limiter l'utilisation de l'eau en optimisant les paramètres techniques ou de pilotage de l'irrigation (volume

d'eau, calendrier, ...) (Bergez *et al.*, 2001 ; Alvarez *et al.*, 2004) ou en déterminant le système d'irrigation le plus approprié (Robertson et Wang, 2004).

- **Conduite d'un système de culture** (31 références) : j'ai inclus dans ce domaine d'étude les 3 études sur des systèmes agroforestiers (Cardoso *et al.*, 2001 ; Huth *et al.*, 2002 ; Penot et Feintrenie, 2005). Il s'agit d'améliorer voire d'optimiser les rotations (Dogliotti *et al.*, 2004), l'utilisation de pesticides (Lewis et Tzilivakis, 2000), la biodiversité dans les systèmes de culture (Stilma *et al.*, 2007), ou de réduire les impacts négatifs sur l'environnement (Rossing *et al.*, 1997 ; Tixier *et al.*, 2008). Il s'agit également de concevoir des systèmes de culture adaptés à des conditions de sécheresse (Carberry *et al.*, 2002a ; Foale *et al.*, 2004), ou d'évaluer l'impact économique d'une technique, comme par exemple un travail réduit du sol (Sanchez-Giron *et al.*, 2007). Enfin certaines études s'attachent à représenter la manière dont le producteur conduit son exploitation (*i.e.* le système décisionnel), que ce soit en culture maraîchère (Navarrete et Le Bail, 2007) ou en grande culture à l'échelle de la sole (Aubry *et al.*, 1998).
- **Conduite d'un système d'élevage** (41 références) : cet intitulé regroupe toutes les études sur des systèmes de production comportant un atelier animal. Il s'agit d'études axées sur la production animale ou sur celle de fourrages, ou d'études s'intéressant aux relations entre production végétale et alimentation animale. Au niveau de la production animale, Dobos *et al.* (2001) traitent de la construction d'un outil d'aide à la décision en système laitier (« HIGRO »), pour l'alimentation et la gestion de génisses de renouvellement. Le système fourrager est considéré à travers l'organisation du pâturage (Cros *et al.*, 2001 ; Coleno *et al.*, 2002), le choix des ressources fourragères produites sur l'exploitation (Val-Arreola *et al.*, 2004), la détermination des modes d'exploitation des prairies (Andrieu *et al.*, 2007). D'autres études visent encore à mieux comprendre le fonctionnement global du système fourrager pour le modéliser (Méot *et al.*, 2003 ; Vayssières *et al.*, 2007). Ce domaine d'étude comporte également des travaux analysant l'effet, sur le système fourrager, de politiques agricoles (Veysset *et al.*, 2005), de variations du prix des intrants (Shalloo *et al.* 2004) ou de divers facteurs (fertilisation, temps des travaux, ...) (ex : Kerr *et al.*, 1999). Enfin plusieurs auteurs (16 références sur les 41) s'intéressent à la durabilité des systèmes mixtes (ex : Agbonlahor *et al.*, 2003 ; Van de Ven et Van Keulen, 2007).
- **Gestion des fertilisants** (19 références) : sous ce domaine d'étude sont regroupées les références visant à améliorer, au sein de l'exploitation, l'efficacité d'utilisation des éléments nutritifs (N, P) (Aarts *et al.*, 2000 a et b) et le recyclage des effluents d'élevage (Guerrin, 2001), ainsi que les études ayant pour objectif de limiter l'achat de fertilisants (Groot *et al.*, 2006) ou les émissions d'azote et/ou de phosphore vers l'environnement (Rotz *et al.*, 2006).
- **Orientations de l'exploitation** (29 références) : ce domaine correspond aux choix stratégiques, concernant les productions (Penot *et al.*, 2005) ou les assolements (Yridoe *et al.*, 2006), les investissements (Louhichi *et al.*, 2004), les niveaux d'intensification (Bosma *et al.*, 1999), l'introduction de nouvelles techniques (Stonehouse *et al.*, 2002) ou de technologies innovantes (Sorensen *et al.*, 2005). Ces choix stratégiques ont pour objectif d'améliorer la production (Cacho *et al.*, 1995), le revenu de l'agriculteur (Torkamani, 2005) ou son bien-être (Waithaka *et al.*, 2006), ou de diminuer les impacts sur l'environnement (Gassman *et al.*, 2006).

- **Problématiques environnementales** (53 références) : à ce domaine sont rattachées les études prenant en compte des aspects environnementaux. Les enjeux environnementaux concernent la qualité de l'eau (nitrate, phosphore, pesticides) (Aarts *et al.*, 2000 a,b ; Gibbons *et al.*, 2005 ; Lewis et Tzilivakis, 2000), la fertilité et l'érosion du sol (Dogliotti *et al.*, 2004), le changement climatique (émission de gaz à effet de serre) (Schils *et al.*, 2005), la biodiversité (Stilma *et al.*, 2007) et l'autonomie du système (Coquil *et al.*, 2007). Plusieurs études s'intéressent également à la conception de systèmes de production durables du point de vue environnemental et économique, comme par exemple Agbonlahor *et al.* (2003) pour un système intégré volaille-culture alimentaire au Nigéria, ou Tixier *et al.* (2008) pour les systèmes bananiers de Guadeloupe.
- **Risque** (10 références) : il s'agit d'études traitant de la conception de systèmes pour faire face au risque climatique (Sadras *et al.*, 2003) ou de travaux évaluant le risque financier d'une nouvelle méthode de production (Torkamani, 2005). Penot *et al.* (2005) étudient avec le logiciel Olympe les risques climatiques et financiers de systèmes agroforestiers à base d'hévéa en Indonésie et au Cambodge en fonction de leur degré d'intensification et de diversification, en évaluant les effets sur le revenu des agriculteurs du phénomène « El Niño » ou d'une variation des prix du caoutchouc et du palmier à huile.

E/ Distribution par échelle d'étude

Les études sur les systèmes de production prennent en compte différents niveaux de représentation : l'échelle de la parcelle ou du troupeau, ou à un niveau supérieur, l'échelle des composantes techniques où les activités ont lieu au niveau de la sole ou de l'atelier, ou encore l'échelle de l'exploitation vu dans son ensemble.

Les 122 références de notre base de donnée se répartissent comme suit :

- Echelle de la parcelle ou du troupeau : 15 références
- Echelle de l'atelier ou de la sole : 25 références
- Echelle de l'exploitation agricole : 82 références.

Notre étude bibliographique portait principalement sur l'échelle de l'exploitation, mais la base de données établie comporte également 15 références au niveau « parcelle/ troupeau » et 25 références à l'échelle de l'atelier ou de la sole. Ces études à des échelles inférieures à celle de l'exploitation ont été prises en compte dans notre analyse car elles avaient pour objectif affiché d'apporter une aide à la conception du système de production tout entier. Un cas emblématique de cette situation est celui du programme australien FARMSCAPE (Carberry *et al.*, 2002a) utilisant un modèle de culture à l'échelle de la parcelle APSIM (voir p. 23). Ces études concernent également des expérimentations à l'échelle de la parcelle visant à appliquer des méthodes participatives ayant pour objectifs, selon leurs auteurs, de concevoir de nouveaux systèmes de production. C'est le cas par exemple de Bonny *et al.* (2005) qui cherchent à favoriser l'utilisation de nouvelles techniques par des riziculteurs en Inde, et de Cardoso *et al.* (2001) pour développer des systèmes agroforestiers au Brésil.

A l'échelle de l'exploitation ou de ses composantes, plusieurs types d'étude peuvent être distingués selon la manière dont elles considèrent le système de production. Il y a d'une part des études axées sur le fonctionnement du système biotechnique de l'exploitation, étudiant l'effet du milieu et des interventions techniques sur la production et sur l'environnement, avec par exemple pour objectif d'améliorer la gestion du phosphore dans une exploitation laitière (Aarts *al.*, 2000a) ou de diminuer les émissions de gaz à effet de serre (Weiske *et al.*, 2006). Certains auteurs s'attachent à représenter également les décisions techniques de l'agriculteur, comme par exemple Aubry *et al.* (1998) qui donnent une représentation conceptuelle de la gestion technique de la sole de blé d'hiver dans des exploitations de grande culture en Picardie. Le pilotage de l'exploitation peut également être considéré en utilisant les concepts de la gestion industrielle. Ainsi Coleno *et al.* (2002) introduisent les concepts d'atelier de production, de planification, de pilotage et de gestion de flux pour représenter la gestion des ressources fourragères dans des systèmes herbagers.

D'autre part, l'exploitation peut être considérée selon une entrée 'bioéconomique', les auteurs s'intéressant dans ce cas à la rentabilité économique du système de production. C'est le cas notamment des études où l'exploitation est représentée sous la forme d'une ou de plusieurs fonctions d'utilité, considérant l'agriculteur comme « rationnel » et s'efforçant à maximiser son profit sous contraintes de ressources, de préférences ou d'exigences réglementaires (approche détaillée dans le paragraphe suivant dans la partie « optimisation » et p.24 dans la méthode de Dogliotti *et al.*, 2005). Cette vision de l'agriculteur comme un décideur « rationnel » se basant sur les coûts et les bénéfices pour choisir une nouvelle technologie est également présente dans les études utilisant des simulateurs budgétaires comme le logiciel Olympe qui permet d'évaluer les résultats technico-économiques de l'exploitation sous différents scénarios de prix des intrants et des produits en fonction des techniques choisies (Penot et Feintrenie, 2005). D'autres études se basent également sur une évaluation du budget de l'exploitation pour décider de la pertinence ou non d'une innovation, sans mobiliser pour autant de modèles informatiques, comme dans l'étude de Dorward *et al.* (2003). Dans cette étude participative, le système de production est évalué *ex ante* par les agriculteurs eux-mêmes, avec un système de notations (détaillé plus loin dans le rapport, dans la partie « approches participatives »).

F/ Distribution par public visé

Quatre grands types de public visé ont été recherchés : chercheur, agriculteur, conseiller ou politique. Il faut toutefois noter que les études visant uniquement les politiques n'ont pas été retenues, car jugées hors du champ de ce travail.

- chercheur : 49 références.
- agriculteur : 58 références.
- conseiller : 87 références.
- politique : 22 références.

Si les agriculteurs et les conseillers restent « sur le papier », les destinataires majeurs des études référencées (99 références sur les 122 visent l'un ou l'autre de ces publics), leur degré de participation dans les études est souvent faible : sur ces 99 références, seules 14 références indiquent une participation des agriculteurs et/ou conseiller pendant le processus de conception, et 41 références concernent des études sans participation des acteurs. Par ailleurs sur ces 99 références destinées aux agriculteurs et/ou à leurs conseillers, 27 affichent la

production d'outils d'aide à la décision, comme Dobos *et al.* (2004) qui ont mis au point un outil d'aide à la décision pour la planification des ressources fourragères.

G/ Distribution par « type de préoccupation »

Trois grands types de préoccupation liés à la conception de systèmes innovants ont été recherchés dans la base de référence : L'évaluation *ex ante* correspond à une approche « *in silico* », qui consiste à évaluer des systèmes de production non encore testés sur le terrain, le plus souvent au moyen d'indicateurs et/ou d'outils de modélisation plus ou moins sophistiqués et aboutis. L'évaluation *ex post* consiste à évaluer des systèmes de production mis en oeuvre sur le terrain dans des stations de recherche ou chez certains agriculteurs. Les méthodes d'évaluation peuvent être similaires à celle de l'évaluation *ex ante*, à la différence près que les variables évaluées seront celles mesurées effectivement sur le terrain et non celles simulées par des modèles. Le pilotage d'un processus caractérise ici les études ayant pour objectif d'aider à la mise en oeuvre sur le terrain d'une nouvelle technique ou méthode, souvent par le biais d'un jeu de règles de décision.

Résultats des requêtes :

- **évaluation *ex ante*** : 82 références. Les critères d'évaluation des systèmes sont très variés, ils concernent notamment le niveau de production (Cacho *et al.*, 1995), la rentabilité économique (Castelan-Ortega *et al.*, 2003), les risques liés aux aléas climatiques (Musshoff et Hirschauer, 2007), et l'organisation du travail (White *et al.*, 2005).

Par exemple, White *et al.* (2005) évaluent les effets de nouvelles variétés de riz proposées pour des systèmes agricoles d'Amazonie péruvienne au niveau de la charge de travail qu'elles vont représenter pour les agriculteurs durant les périodes de pointe. Souvent plusieurs critères sont pris en compte (Dogliotti *et al.*, 2005).

- **évaluation *ex post*** : 32 références. Les critères d'évaluation sont principalement économiques (Sanchez-Giron *et al.*, 2007), agronomiques (Cardoso *et al.*, 2001) et environnementaux (Aarts *et al.*, 2000 a et b). Par exemple, Aarts *et al.* (2000 a et b) évaluent les bilans en N et P d'une exploitation « prototype » (ferme expérimentale « de Marke » gérée par la recherche néerlandaise), résultant de la méthode de conception dite du « prototypage ».

Certaines études regroupent ces 2 aspects (Robertson *et al.*, 2000) : des systèmes innovants sont évalués *ex ante* de manière à ne retenir que le(s) système(s) le(s) plus « performant(s) » qui sont ensuite testés sur le terrain, puis font l'objet d'une évaluation *ex post*.

n.b.: Rossing *et al.* (1997) considère l'évaluation *ex ante* comme une approche « orientée conception » (*design-oriented approach*), qui s'attache à mettre en évidence les futures options de développement, alors que l'évaluation *ex post* concerne le passé et a pour objet d'évaluer les conséquences de stratégies ou de politiques agricoles. Néanmoins, il est nécessaire que les systèmes conçus « par ordinateur » passent, à un moment ou à un autre, par une phase de validation sur le terrain, et donc d'évaluation *ex post*.

- **pilotage d'un processus** : 19 références. Il s'agit par exemple de méthodes destinées à aider à mettre en place une protection intégrée des cultures (Lewis et Tzilivakis, 2000), à gérer des surfaces pâturées (Duru et Hubert, 2003) ou à économiser l'eau d'irrigation (Bergez *et al.*, 2001). Parmi ces 19 études, seules 8 affichent la production d'un outil d'aide à la décision.

H/ Distribution par type d'outil mobilisé

Pour concevoir des systèmes de production innovants, trois grands types d'outils sont utilisés : l'expérimentation de terrain (en station de recherche ou chez des agriculteurs), la modélisation informatique, et des outils facilitant le dialogue et renforçant les capacités des acteurs (formation, apprentissage, aide à la décision).

Résultats :

- **expérimentation** : 17 références. Par exemple, Stilma *et al.* (2007) construisent et expérimentent avec des acteurs des systèmes de culture dans l'objectif est de favoriser ou préserver la biodiversité *in situ*.
- **modélisation** : 101 références (sur 122) utilisent un modèle informatique, soit une grande majorité (ce qui tient surtout aux critères choisis pour établir notre base de données).
- **renforcement des capacités des acteurs** (formation, apprentissage, aide à la décision) : 15 références concernent des études s'intéressant à l'apprentissage proprement dit des acteurs (Bonny *et al.*, 2005) et 55 ont pour objet des outils d'aide à la décision, que ce soit au niveau de leur conception (Brown *et al.*, 2005) ou de leur utilisation par des acteurs (Donnelly *et al.*, 2002). Je pense que le faible nombre de références dans la catégorie « renforcement des capacités des acteurs » provient du fait que ma base ne contient que des études où la formalisation/modélisation est présente. L'apprentissage tient donc encore une place peu importante dans les études s'attachant à formaliser des méthodes de conception.

Seules 6 études combinent l'expérimentation et la modélisation, notamment Oenema *et al.* (2001) qui utilisent un modèle pour calculer le bilan azoté d'exploitations laitières sur lesquelles des expérimentations sont conduites pour limiter les pertes d'azote. Ce faible nombre de références peut provenir du fait que les études sont souvent publiées de manière fractionnée, une référence traitant alors des expérimentations et l'autre de la modélisation.

3.2. Méthodes de conception

Dans cette partie, 5 grandes familles de méthode de conception sont présentées et discutées à partir de cas-types, puis le degré de participation des acteurs dans le processus de conception ainsi que le niveau de formalisation et d'implémentation informatique des modèles mobilisés sont étudiés dans les diverses méthodes repérées dans la base de références.

A/ Présentation de 5 grandes familles de méthode de conception à partir de 5 cas-type

Nous avons mentionné dans l'analyse des données, l'existence de trois grands types d'outil pour concevoir des systèmes de production innovant : l'expérimentation, la modélisation et le renforcement de la capacité des acteurs. Les références analysées dans le cadre de ce travail montrent diverses combinaisons de ces trois grands types d'outil qui aboutissent à 5 grandes familles de méthode de conception. Chacune de ces familles est illustrée ci-dessous par un cas-type.

a/ La conception basée sur une approche participative

Un exemple de conception basée sur le renforcement de la capacité des acteurs à travers une approche participative est donné par Cardoso *et al.* (2001). Cette étude avait pour objectif de développer des systèmes agroforestiers améliorant la fertilité des sols et diminuant leur érosion sur des zones de culture déforestées au Brésil, en associant des agriculteurs, des chercheurs et le personnel d'une organisation non gouvernementale.

La méthodologie suivie dans cette étude a reposé sur cinq grandes étapes : dans un premier temps, les chercheurs ont fait un tour d'horizon de la situation pour évaluer la faisabilité du projet, en interviewant les agriculteurs de la zone d'étude. Cette étude préliminaire a mis en évidence l'existence de trois types de systèmes agroforestiers déjà mis en œuvre sur la zone d'étude par quelques agriculteurs.

Puis une évaluation participative de la situation, au moyen de groupes de discussion et de questionnaires, a été réalisée sur un village pour identifier les problèmes rencontrés par les agriculteurs et leurs solutions. Un des principaux problèmes mis en évidence par les agriculteurs participant à cette démarche est la faible productivité de leurs terres, qu'ils attribuaient à des problèmes de dégradation du sol comme l'érosion. Ces problèmes ont été hiérarchisés et un comité composé d'agriculteurs, de membres de l'ONG et de chercheurs a suggéré l'agroforesterie comme une solution aux problèmes de dégradation des sols.

En troisième lieu, une étape de diagnostic et de conception a été menée pour approfondir les différentes options d'agroforesterie (notamment au niveau du choix des espèces) et pour faire ressortir la connaissance locale sur les arbres et sur leur intégration dans les systèmes de production. Des visites de systèmes agroforestiers ont été organisées, ainsi qu'une conférence par une personne reconnue dans ce domaine au Brésil. Durant cette phase, les agriculteurs ont choisis les espèces qu'ils voulaient mettre en place sur leur exploitation.

La quatrième étape du projet a été d'organiser des réunions pour finaliser les premières expérimentations sur les nouveaux systèmes. Enfin, les systèmes mis en place ont été suivis et évalués de manière collective. Les expérimentations ont été réalisées sur 33 exploitations sur des parcelles d'environ 1000 m².

L'évaluation participative a consisté en un choix des indicateurs à suivre par les agriculteurs, les chercheurs proposant les analyses à réaliser.

La limite de cette étude est quelle est très contextuelle et difficilement transposable à d'autres situations. Par ailleurs, si les objectifs des auteurs étaient au départ de concevoir un nouveau système de production, au final, les expérimentations sont réalisées à l'échelle de la parcelle.

b/ La conception basée sur l'expérimentation : la méthode du prototypage

La méthode du prototypage est caractérisée par une conception basée sur des expérimentations de terrain. Ce qui la différencie le plus des études expérimentales de terrain (comme par exemple celle de Jordan *et al.*, 1997) c'est la définition d'objectifs détaillés et chiffrés à atteindre par le système prototype. Comme nous le verrons au paragraphe suivant, elle implique la participation des acteurs.

En 1997, dans le cadre d'une série de programmes européens sur la mise au point de systèmes intégrés ou écologiques, Vereijken, un chercheur des Pays-Bas, a formalisé une méthode de conception des systèmes de production végétale, qu'il a nommé le prototypage (prototyping). Cette méthode vise une aide à la conception au niveau stratégique de systèmes de production intégrés (*integrated arable farming systems*, IAFS) ou écologiques (*ecological arable farming systems*, EAFS).

Vereijken a distingué 5 grandes étapes dans cette méthode, dont il donne un exemple d'application au prototypage d'EAFS au Flevoland, une région argileuse des Pays-Bas. Ces étapes consistent en :

1/ La hiérarchisation des objectifs à atteindre : des experts (chercheurs de différentes disciplines, agents de développement et agriculteurs) définissent en commun les objectifs à atteindre pour améliorer les systèmes de production de la région d'étude, sur le court terme (on vise alors des IAFS) ou sur le long terme (on vise ici des EAFS). Ces objectifs sont ensuite hiérarchisés au cours de discussions entre acteurs en utilisant un système de notation.

2/ La transformation de ces objectifs en paramètres et l'établissement de méthodes : les principaux objectifs sont traduits en indicateurs multi-objectifs quantifiables (ex : diversité des espèces végétales, teneur en phosphore disponible du sol, indice de la qualité de production), qui seront utilisés pour évaluer le système. Les experts déterminent ensuite les méthodes multi-objectifs qui permettront d'atteindre ces objectifs quantifiés. Dans le cas type du Flevoland, les méthodes proposées sont :

a/ une rotation multifonctionnelle des cultures, qui consiste à les alterner dans le temps et dans l'espace de façon à ce que leur vitalité et la qualité de production peut être assurée avec un minimum de mesures et d'intrants ;

b/ une gestion écologique des nutriments, reposant sur un bilan des entrées et des sorties des éléments nutritifs, de manière à approvisionner suffisamment les sols et à être 'écologiquement acceptable' ;

c/ une gestion des infrastructures écologiques, de manière à ce que le réseau des éléments paysagers soit accessible et habitable par la faune et la flore sauvage et attractif pour les promeneurs ;

d/ une optimisation des facteurs de production de l'exploitation, afin que le prototype optimal du point de vue agro-écologique soit également optimal économiquement (il s'agit d'estimer les quantités de terre, de travail et de biens qui sont nécessaires pour atteindre une certaine marge).

3/ La conception d'un prototype théorique et des méthodes associées : le prototype théorique est construit sous forme d'un schéma reliant les paramètres à atteindre et les méthodes à utiliser, et précisant dans quel ordre elles doivent être mises en œuvre afin d'atteindre tous les objectifs fixés. Par exemple, le prototype théorique mis au point par Vereijken au Flevoland consiste en premier lieu à reconcevoir les successions et les assolements de culture (qui tient une place centrale dans la conception du prototype), puis à modifier la gestion des fertilisants, puis à reconfigurer les infrastructures écologiques de l'exploitation, et en dernier ressort à optimiser les facteurs de production de l'exploitation. Les méthodes sont explicitées jusqu'à ce qu'elles puissent être testées.

4/ Le test de ce prototype et son amélioration : le prototype théorique mis au point dans l'étape précédente est testé en « conditions réelles », soit dans une ferme expérimentale, soit directement dans des fermes pilotes chez des agriculteurs 'volontaires'. Vereijken (1997) privilégie l'expérimentation en fermes pilote (10-15 fermes) qui permet de couvrir les principales conditions pédoclimatiques et de conduites de système de la zone d'étude. Les prototypes testés ne sont alors pas tous identiques, mais adaptés au contexte de l'exploitation.

L'expérimentation permet d'évaluer le prototype (et ses variantes) en fonction des paramètres définis dans la première étape. Si les objectifs ne sont pas atteints, un nouveau travail collectif est demandé ici aux experts pour adapter le prototype, sur la base des règles de décision préalablement établies concernant le mode d'ajustement des techniques. Puis les expérimentations reprennent, jusqu'à ce que les objectifs soient atteints. L'étape du test du prototype est la plus lourde, car elle nécessite au moins une rotation complète du prototype sur chaque parcelle (soient 4 à 6 années pour les IAFS-EAFS).

5/ La diffusion du prototype : une fois que les objectifs du prototype ont été atteints, il doit ensuite entrer dans une phase de test et d'adaptation plus large avec les acteurs, c'est la 'diffusion'. Si le prototype n'a été testé précédemment que dans une ferme expérimentale, il doit d'abord être expérimenté dans un réseau de fermes pilote (10 à 15 exploitations) avant d'être diffusé au moyen de réseaux régionaux voire nationaux, avec un transfert progressif de la supervision, des chercheurs vers les conseillers. Vereijken indique que le groupe initial de fermes pilote peut servir comme fermes de démonstration, les agriculteurs servant de formateurs pour d'autres agriculteurs intéressés par le prototype.

Ses évolutions

Depuis sa formalisation par Vereijken en 1997, elle a été reprise et adaptée par de nombreux auteurs (Kabourakis et Vassiliou, 1999 ; Aarts *et al.*, 2000 a et b ; Hilhorst *et al.*, 2001 ; Stoorvogel *et al.*, 2004 ; Langeveld *et al.*, 2005 ; Coquil *et al.*, 2007 ; Lançon *et al.*, 2007) dans plusieurs régions du monde (Crète, Costa Rica, France, Guadeloupe, Kenya ...). Si dans son manuel de prototypage Vereijken (1999) destinait cette méthode aux exploitations de productions végétales, elle a aussi été appliquée à d'autres systèmes de production, notamment sur l'exploitation laitière 'De Marke' (voir *e.g.* Langeveld *et al.*, 2005). Elle est également en cours d'utilisation sur le domaine expérimental de la station de recherche de l'INRA de Mirecourt (Coquil *et al.*, 2007) pour aider à la conception de 2 systèmes de

production : un système d'élevage laitier herbager et un système de polyculture élevage laitier.

Par ailleurs, Vereijken préconisait l'expérimentation directe du prototype en fermes pilotes (10-15 exploitations) plutôt que de le tester d'abord en ferme expérimentale. Mais les expérimentations de la plupart des études basées sur la méthode du prototypage (contenues dans notre base de données) ont été réalisées sur des fermes expérimentales, que ce soit sur la ferme 'De Marke' (Aarts *et al.*, 2000 a et b ; Hilhorst *et al.*, 2001 ; Oenema *et al.*, 2001) ou sur d'autres domaines expérimentaux (Coquil *et al.*, 2007).

D'autre part, la démarche de prototypage a été mise au point initialement par Vereijken pour concevoir des systèmes de production « intégrés » ou écologiques à l'échelle de l'exploitation agricole. D'autres études l'ont utilisée à l'échelle de la parcelle, comme Lançon *et al.* (2007) qui l'ont adapté à la conception de l'itinéraire technique d'une culture cotonnière en Afrique de l'Ouest.

Une autre évolution importante de la méthode du prototypage est l'utilisation de modèles numérisés. Par exemple, Aarts *et al.* (2000) se basent sur des modèles simples pour calculer les doses de fertilisants pour différentes parcelles et la composition de l'alimentation à utiliser dans une exploitation laitière néerlandaise pour ne pas dépasser les valeurs règlementaires de pertes d'azote. D'autres auteurs vont plus loin en utilisant des modèles pour concevoir le prototype et l'évaluer *ex ante*. C'est le cas notamment de Waithaka *et al.* (2006) qui utilisent la modélisation participative avec la méthode du prototypage pour évaluer la performance bio-économique de différents scénarios basés sur des objectifs et contraintes définis par des agriculteurs du Kenya pour leurs exploitations. A l'échelle du système de culture, Tixier *et al.* (2008) utilisent quant à eux un modèle de simulation agronomique et un module d'évaluation multicritères pour concevoir et évaluer *ex ante* des systèmes bananiers durables en Guadeloupe.

Ses atouts et ses limites

La méthode du prototypage peut être très efficace pour faciliter l'interdisciplinarité entre des chercheurs et impliquer les agriculteurs dès le départ (Loyce et Wery, 2006). Elle permet également d'incorporer des savoirs d'experts non formalisés. Par ailleurs, plusieurs modifications peuvent être introduites simultanément dans le système, sans avoir à documenter systématiquement leurs interactions. D'après Lançon *et al.* (2007), cette méthode aurait l'avantage de produire rapidement des systèmes de culture innovants et de les diffuser dans des fermes pilotes. Cependant, l'évaluation sur le terrain du prototype nécessite du temps (4 à 6 ans d'après Vereijken (1997)), et entre-temps les contextes de prix, de politique agricole ou d'innovation technologique peuvent avoir changé, rendant caduques ou obsolètes les prototypes testés.

La méthode comporte également d'autres limites. Tout d'abord la nécessité d'obtenir un consensus entre experts sur un ou plusieurs prototypes théoriques lors de la phase initiale peut laisser de côté beaucoup de combinaisons innovantes qui ne correspondent pas au point de vue issu du compromis entre les experts (Sterk *et al.*, 2007). Par ailleurs, la formalisation et la transparence des processus d'agencement et de modification des éléments du prototype sont le plus souvent sommaires, ce qui rend le processus difficilement opposable par d'autres experts (Rossing *et al.*, 1997). Ensuite, la variabilité climatique et les risques associés sont difficiles à prendre en compte, et ce pour chacune des étapes du prototypage. La taille du réseau

d'expérimentation limite notamment le nombre de systèmes testés, et l'exploration de leur domaine de validité (Lançon *et al.*, 2007).

La modélisation partielle du système est susceptible d'apporter des progrès pour pallier ces difficultés. Les modèles peuvent fournir une aide durant la phase de conception, en générant par exemple des systèmes de culture répondant à plusieurs objectifs (Dogliotti *et al.*, 2004) et en permettant de sélectionner sur la base d'une évaluation *ex ante*, le ou les prototypes qui seront expérimentés sur le terrain (Waithaka *et al.*, 2006). Rossing *et al.* (1997) indiquent que les modèles exploratoires peuvent être utilisés tout au début de la démarche de prototypage, en indiquant le potentiel de production du système, qui, combiné avec le diagnostic réalisé sur le terrain, permettrait d'identifier les contraintes du système. Rossing *et al.* (1997) et Sterk *et al.* (2007) suggèrent que les modèles de ferme pourraient également être utiles dans la phase de diffusion des prototypes, notamment pour adapter le prototype à d'autres conditions ou pour la communication de leurs résultats. Ten Berge *et al.* (2000) soulignent cependant que le type de contribution de la modélisation au prototypage va dépendre pour beaucoup de la disponibilité du modèle (c'est-à-dire de la rapidité avec laquelle il est mis au point pour la problématique étudiée). De même, Sterk *et al.* (2006) constatent également que l'obstacle majeur à l'utilisation de modèles dans la méthode du prototypage est le délai nécessaire au développement du modèle (qui est souvent trop long). Néanmoins, il ne faudrait pas que l'utilisation de modèles aboutisse à la disparition de la phase d'expérimentation de terrain, qui constitue une étape fondamentale du prototypage.

Un autre point faible de cette méthode semble être l'étape de diffusion du prototype, une fois mis au point en domaine expérimental ou en fermes pilotes, vers les autres exploitations de la zone d'étude. Cette approche diffusionniste de l'innovation entre les agriculteurs, à partir de fermes pilotes, est un processus généralement peu efficace.

c/ La conception utilisant expérimentation, modélisation et approche participative : la méthode FARMSCAPE

FARMSCAPE (*Farmers', Advisers', Researchers', Monitoring, Simulation, Communication and Performance Evaluation*) est un programme australien de recherche-action participative (« *participatory action research* ») d'envergure de par les moyens humains et financiers qu'il a mobilisé sur une période de 10 ans (Carberry *et al.*, 2002a). L'approche de cette recherche-action participative conduite par l'Unité de Recherche « Systèmes de Production Agricole » (APSRU) du CSIRO a été d'explorer si les agriculteurs étaient enclins à utiliser la simulation comme un outil d'aide à la décision pour conduire leurs exploitations (Carberry *et al.*, 2002a). La cible initiale de ce projet était les agriculteurs du Nord-Est de l'Australie, et l'objectif était de leur fournir des outils d'aide à la décision afin d'améliorer ou de reconcevoir leurs systèmes de culture situés en zone aride et soumis à une forte variabilité climatique interannuelle. Pour cela, ce projet s'est basé sur le modèle APSIM (*Agricultural Production Systems Simulator*) préalablement développé au sein de l'APSRU (McCown *et al.*, 1996).

APSIM est un modèle agronomique dynamique modélisant les systèmes biotechnique et décisionnel. Le système biotechnique peut simuler la croissance de plusieurs cultures, de leurs successions ainsi que la production des prairies. Certaines actions (par exemple le choix de la culture, le semis, la fertilisation, le travail du sol ou l'irrigation) peuvent être contrôlées avec des règles de décision du type "Si condition(s) Alors action(s)".

Carberry *et al.* (2002a) indiquent que la participation active des agriculteurs et de leurs conseillers, et le fait de travailler dans le contexte de leurs propres pratiques agricoles, ont été des éléments clé dans la conception et la mise en œuvre de l'approche FARMSCAPE pour l'aide à la décision.

Ce programme qui a duré 10 ans, a demandé beaucoup d'investissement en temps de la part des participants. L'utilisation du modèle a surtout renforcé les capacités d'apprentissage des agriculteurs en leur permettant, d'une part, d'acquérir une expérience sur leur système en testant différents scénarios *in silico* donc « sans risque », et d'autre part de comprendre plus finement les causes d'un résultat, en les faisant réfléchir sur les répercussions de leur mode de conduite. Les retombées positives ont donc surtout consisté, d'une part, en une meilleure connaissance du sol et de ses fonctions agronomiques par les agriculteurs (notamment en ce qui concerne les réserves en eau et en azote des couches profondes du sol) et, d'autre part, en une meilleure acceptation des modèles par les conseillers techniques et les agriculteurs, devenus moins sceptiques à leur égard.

Le projet a également permis de mettre en évidence que les conseillers agricoles étaient plus à même d'utiliser APSIM comme outil d'aide à la décision que les agriculteurs eux-mêmes. En 2002, les efforts se sont centrés sur la formation de conseillers agricoles (privés) aux outils et à l'approche de Farmscape, pour une utilisation plus large de cette méthode.

Les changements de pratique induits par le programme FARMSCAPE chez les agriculteurs participants ont été de deux ordres :

- une majorité de modifications des itinéraires technique assez simples et pour des agriculteurs de manière individuelle, comme un décalage dans la date de semis ou une modification de la dose d'engrais ;
- quelques innovations plus importantes dans les pratiques sur une zone plus grande, comme par exemple le semis au printemps du « haricot mung » préalablement effectué en été (suite à des simulations par APSIM décrites dans Robertson *et al.* (2000) montrant de meilleurs rendements) ou encore un regain d'intérêt pour la culture du maïs dans le Sud Est du Queensland (dont les simulations avec APSIM ont montré qu'il pouvait être un compromis intéressant au sorgho dans cette région).

Mais ces innovations, même si elles induisent des répercussions au niveau des systèmes de culture voire du système de production, n'ont pas été conçues à cette échelle, ce qui provient du fait que ce programme de recherche a surtout reposé sur le modèle de culture APSIM fonctionnant à l'échelle de la parcelle. Les allocations de ressources entre activités qui existent à l'échelle de l'exploitation ne sont donc pas prises en compte par le modèle.

Un autre point faible de cette méthode est l'accompagnement des acteurs qui est faible, comme nous le verrons par la suite.

d/ La conception basée sur les modèles informatiques : l'approche *in silico* de Dogliotti *et al.* (2005)

D'autres méthodes de conception accordent une place majeure aux modèles numérisés et ne font pas participer les acteurs. De ce fait, elles sont souvent qualifiées de '*in silico*'. Ce type de conception est illustré par l'étude de Dogliotti *et al.* (2005) qui mobilisent un modèle bioéconomique d'optimisation (utilisant la programmation linéaire).

L'étude de Dogliotti *et al.* (2005) traite de la conception et de l'évaluation *ex ante* de nouveaux systèmes de culture maraîchère dans le Sud de l'Uruguay, dont les objectifs assignés sont de diminuer l'érosion des sols, de maintenir le niveau de matière organique des sols et d'accroître le revenu des agriculteurs. C'est un exemple d'application d'un modèle d'optimisation basé sur la programmation linéaire multi-objectifs (Multiple-Goal Linear Programming ou MGLP) à la reconception *in silico* de systèmes de production.

Cette étude présente l'originalité d'utiliser en amont du modèle d'optimisation un modèle de génération et d'optimisation de successions culturales (ROTAT, Dogliotti *et al.*, 2003), basé sur des règles agronomiques définies par l'utilisateur. Ce modèle génère toutes les rotations agronomiquement possibles, auxquelles on associe des techniques de production (mécanisation, irrigation, usage de pesticides) pour créer une large gamme d'activités de production à l'échelle de la parcelle. Les activités considérées dans le modèle de programmation linéaire multi-objectif nommé « Farm Images » (*Interactive Multi-Goal Agro-ecological Generation and Evaluation of Systems*) comprennent à la fois les systèmes de culture actuels ainsi que de nouveaux systèmes de culture et de nouvelles activités comme un atelier de production animale (élevage de bœufs) alimenté principalement par les fourrages produits sur l'exploitation. Les coefficients techniques des activités sont calculés à partir de modèles biophysique paramétrés avec des données locales.

Ces données sont ensuite utilisées par le modèle Farm Images qui conçoit des systèmes de production alternatifs à l'échelle de l'exploitation en affectant de manière optimale les activités de production aux différentes unités de sol de l'exploitation, en fonction de la disponibilité des ressources et des priorités données à différents objectifs de durabilité. Pour cela le modèle prend en compte 7 fonctions dont les objectifs sont de maximiser le revenu et la marge brute des agriculteurs et de minimiser les effets sur l'environnement, sous différentes contraintes. Ces dernières correspondent aux ressources disponibles sur la ferme (type de sol, temps de travail, capital, matériel), ainsi qu'aux limitations imposées par la complexité du système de culture et par les préférences de l'agriculteur (nombre maximum d'activités de production par ha, nombre maximal de cultures différentes sur l'exploitation, taille minimale des parcelles, ...).

Les auteurs appliquent cette méthode de conception par programmation mathématique à 7 exploitations du Sud de l'Uruguay présentant des disponibilités en ressources contrastées, de manière à analyser les possibilités d'amélioration des systèmes. Les auteurs concluent en proposant de nouveaux systèmes de production plus durables, qui pourraient faire l'objet de discussion avec les agriculteurs concernés avant leur expérimentation sur le terrain.

On notera que la participation des agriculteurs dans cette méthode de conception *in silico* reste très sommaire. Ils sont seulement consultés pour donner un avis d'expert, par exemple sur le montant des coûts fixes. Dogliotti *et al.* (2005) soulignent par ailleurs que cette méthode de conception, permettant de concevoir et d'évaluer *ex ante* une large gamme de systèmes alternatifs avec des critères de conception et d'évaluation explicites et transparents, pourrait être mise à profit dans la phase de conception de la méthode dite du prototypage (Vereijken, 1997).

Cette approche comporte cependant plusieurs limites, dont les principales sont la participation très peu importante des agriculteurs et la faible représentation de leurs processus de décision. Cette méthode de conception est donc très lourde à mettre en œuvre, car la technique de modélisation est complexe et ne peut donc pas être utilisée par des conseillers, d'autant plus

qu'ils ne sont pas associés à la modélisation. Il manque par ailleurs une expérimentation de terrain du système conçu *in silico*. Une amélioration à ce type de méthode consiste à inclure les acteurs dans la démarche, comme proposés par Thornton et Herrero (2001), dans leur approche de « modélisation participative » présentée plus loin.

e/ La conception basée sur une représentation du système de décision de l'agriculteur : l'approche OTELO

Le modèle OTELO (Attonaty *et al.*, 1991) a été choisi car il représente un des rares exemples de formalisation numérisée et générique des règles de gestion des agriculteurs.

OTELO est un logiciel de simulation de l'organisation du travail dans les exploitations de grandes cultures mis au point en France dans les années 1990 par Attonaty. Il a été conçu pour être un instrument d'apprentissage pour les agriculteurs et il est centré autour de l'agriculteur en tant que décideur et sur ses pratiques. Sa mise en œuvre nécessite la formalisation des processus de décision de l'agriculteur, puis la représentation informatique de ce modèle conceptuel dans un cadre qui fait appel à trois classes d'objets (trois niveaux de gestion), des règles de production et un langage dédié. Un simulateur exploite ensuite ce système de règles, en fonction des scénarios climatiques choisis par l'utilisateur. Les résultats de la simulation sont un calendrier de travail que l'agriculteur peut analyser pour apprécier la pertinence de ses règles de décision et le niveau de risques qu'elles induisent.

Le modèle conceptuel

L'organisation du travail est représentée par un modèle conceptuel identifiant des variables et des règles de décision. Trois niveaux de gestion hiérarchisés ('les classes d'objets') sont discernés : les périodes, les enchaînements et les chantiers. La notion de période renvoie au fait que des opérations culturales sur des cultures différentes peuvent être concomitantes sur l'exploitation : elles deviennent concurrentes si elles doivent utiliser tout ou partie des mêmes ressources en main-d'œuvre ou en matériel. On constate alors que l'agriculteur découpe le temps en intervalles caractérisés par une priorité donnée entre les opérations à réaliser, que l'on appelle période. Les périodes sont régies par des règles d'arbitrage entre cultures. Les enchaînements sont les successions des opérations culturales dans le temps, sur une culture ou entre cultures. Des règles d'enchaînement, mais aussi des règles de déclenchement et de fin des opérations, régissent la succession prévue des opérations dans le temps sur une période. Le chantier est la combinaison élémentaire des moyens en matériels et en main d'œuvre nécessaires à la réalisation d'une opération ou d'une combinaison d'opérations.

Les règles de gestion

Les règles de décision sont exprimées sous la forme SI conditions ALORS décisions. Les conditions mettent en œuvre des indicateurs (climatique, calendaire, sur la disponibilité des ressources en travail, sur l'état d'avancement des travaux), contenus dans un système d'informations commun à tous les niveaux de gestion. Les décisions en revanche sont spécifiques à chacun des trois niveaux de gestion (chantier, enchaînement et période). L'écriture des règles de gestion utilise un langage dédié, relativement proche du langage habituel.

Les simulations

Chaque jour, le logiciel simule les décisions de l'agriculteur en se conformant à ses règles d'organisation du travail, selon le scénario climatique choisi (différents scénarios climatiques peuvent être testés). Le logiciel fournit alors le journal des travaux réalisés, à savoir la date de réalisation, l'enchaînement et le chantier réalisés, la surface travaillée, la main d'œuvre et le matériel utilisés, les caractéristiques de la surface traitée (culture, terrain, autre), la qualité obtenue, la période et l'horaire en cours, ainsi que la durée et la plage de travail.

Contrairement à l'approche précédente, la modélisation est centrée sur les règles de gestion de l'agriculteur et sur son système technique et pas sur le système biophysique. Cependant, ce modèle, bien que déjà complexe pour être utilisé directement par un conseiller, ne traite que d'une question spécifique. Il ne peut par ailleurs pas simuler les conséquences agronomiques ou environnementales des décisions prises sur le système de production, car il n'est pas couplé avec un modèle biotechnique.

B/ La participation des acteurs dans le processus de conception et dans la modélisation

Plusieurs auteurs indiquent que la participation des acteurs dans le processus de conception est importante pour qu'ils adoptent par la suite les systèmes conçus, que la conception s'appuie sur la modélisation (Thornton et Herrero, 2001) ou non (Stoorvogel *et al.*, 2004).

La participation des agriculteurs permet en effet de tenir compte de leurs préoccupations (Stoorvogel *et al.*, 2004) mais également de valoriser leurs savoirs (Cardoso *et al.*, 2001), ou de s'assurer de la faisabilité des systèmes (Vayssières *et al.*, 2007).

Le degré de participation des acteurs (ici les agriculteurs ou leurs conseillers) dans le processus de conception (avec ou sans utilisation de modèle) est réparti comme suit :

- **absence de participation (60 références)** : les acteurs ne sont associés à aucun stade du processus de conception, ce qui est assez fréquent dans les études utilisant la modélisation (ex : Buisse *et al.*, 2005) ;
- **avant (48 références)** : les acteurs définissent les objectifs du système (Stoorvogel *et al.*, 2004) et fournissent des données sur leurs exploitations pour alimenter des modèles (Castelan-Ortega *et al.*, 2003) ;
- **pendant (16 références)** : les acteurs travaillent avec les chercheurs à la construction du modèle et à son utilisation pour résoudre une question précise (Vayssières *et al.*, 2007) ou à la mise en œuvre du système innovant (Robertson *et al.*, 2000) ;
- **après (42 références)** : les acteurs sont associés à l'évaluation du système de production conçu ou modélisé (Defoer *et al.*, 1998).

Dans chacun des 3 derniers cas, la participation des acteurs peut être plus ou moins forte. Elle est généralement forte dans les études de type recherche participative ou recherche-action, où les acteurs sont impliqués dans la conception (Cardoso *et al.*, 2001) ou l'évaluation du système de production (Dorward *et al.*, 2003). Paradoxalement, elle est souvent faible dans les études traitant de conception de systèmes d'aide à la décision (DSS), qui détaillent la modélisation employée et les manières dont ils pourraient être utilisés, mais pas l'utilisation réelle du DSS par des acteurs (ex : Donnelly *et al.*, 2002). Ainsi 41 études sur les 99 références dont la finalité est l'aide aux agriculteurs ou à leurs conseillers sont réalisées sans leur participation.

Si l'agriculteur joue un rôle central dans l'exploitation, sa participation dans la conception reste donc très variable, et souvent inexistante. Cependant, il est difficile d'apprécier avec finesse le degré réel de participation des acteurs dans les articles publiés, soit parce que cet aspect est occulté ('hors sujet'), soit au contraire, parce que l'étude insiste sur l'aspect participatif.

Exemples de types de participation rencontrés :

Des exemples de participation des acteurs pour chacune des 5 méthodes identifiées dans le paragraphe précédent sont précisés ci-dessous.

➤ Exemple 1 : participation des acteurs dans les méthodes de type recherche-action

L'étude de Dorward *et al.* (2003) présente l'originalité de mettre en oeuvre une recherche participative ayant pour objet l'évaluation *ex ante* d'un système de production, sans utilisation de modèle informatisé, à l'échelle de l'exploitation. Plus précisément, il s'agit d'étudier la pertinence de l'utilisation d'engrais verts chez des producteurs de tomate au Ghana. Les méthodes d'évaluation *ex ante* proposées dans cette étude reposent d'une part sur le '*participatory budgeting*', pour quantifier et analyser les ressources et les productions d'une exploitation, et d'autre part sur les '*scored causal diagrams*', pour examiner en détail les causes et les effets des problèmes rencontrés sur l'exploitation et pour les hiérarchiser.

Dans la méthode du '*participatory budgeting*', les producteurs établissent le budget de l'exploitation, c'est-à-dire qu'ils indiquent sur une grille, pour chaque période de temps, les types de ressources utilisées et produites. A partir de cette grille, différents scénarios peuvent être testés (ex : effet d'un retard des pluies ou d'un changement des prix). Dans les '*scored causal diagrams*', les producteurs indiquent et hiérarchisent les relations de cause à effet des problèmes rencontrés (à partir de leurs propres connaissances). Ces diagrammes sont utilisés pour comprendre les principales contraintes rencontrées par les agriculteurs dans la zone d'étude.

Dans cette étude, la démarche a consisté dans un premier temps à établir des budgets participatifs des exploitations en se fondant sur les pratiques en cours. Puis les chercheurs ont expliqué les bases des engrais verts aux producteurs. Après discussion, ceux-ci ont adapté le 'budget participatif' en réfléchissant comment ils pourraient inclure un engrais vert dans leur système qui soit bénéfique à la production de tomate, et pour explorer les implications que cela aurait en terme de ressources. Des comparaisons ont ensuite été réalisées avec les pratiques courantes des producteurs. Les auteurs de l'étude estiment que cette méthode participative permet d'améliorer les chances d'une adoption future de l'innovation ainsi évaluée *ex ante* avec les producteurs.

➤ Exemple 2 : participation des acteurs dans la méthode du prototypage

Dans la méthode de conception dite du « **prototypage** » (Vereijken, 1997), les agriculteurs ou leurs conseillers peuvent participer directement à la définition des objectifs du système de production (SP), ou aux expérimentations des prototypes de SP dans leurs exploitations. De plus, les agriculteurs et leurs conseillers sont fortement associés à l'évaluation des résultats puis à la phase de diffusion du prototype. Le type d'acteur impliqué dans chacune des phases du prototypage est détaillé par Langeveld *et al.* (2005). Des exemples de participation des

acteurs à la conception de systèmes de production dans le cadre de la méthode du prototypage sont indiqués ci-dessous.

Dans l'étude d'Oenema *et al.* (2001) l'accent est mis sur le rôle des agriculteurs dans la phase de diffusion des prototypes. Après la mise en œuvre et l'évaluation d'un prototype dans une ferme expérimentale (ici une exploitation laitière, la ferme expérimentale de Marke), l'objectif de la méthode du prototypage est en effet de diffuser le prototype dans des fermes pilotes dans un premier temps, puis plus largement, dans les exploitations de la région d'intervention du projet. Leur étude montre que les agriculteurs des fermes pilotes ont un rôle positif, d'une part sur la conception en donnant leur avis sur les résultats et en fournissant de nouvelles idées, et d'autre part sur la diffusion, en partageant leurs expériences entre eux et avec d'autres agriculteurs.

Stoorvogel *et al.* (2004) appliquent la méthode du prototypage sur une plantation de banane au Costa Rica, avec une forte participation de l'agriculteur dans toutes les étapes de la méthode. L'agriculteur a adopté certaines innovations proposées à la suite de l'étude (comme par exemple une fertilisation ajustée en fonction de l'ancien usage des sols).

Néanmoins, Sterk *et al.* (2007) notent que dans beaucoup d'études utilisant le prototypage, la phase de définition des objectifs intervient trop en amont du projet (avant que les acteurs interviennent), et n'est donc souvent que le fait des chercheurs.

➤ **Exemple 3 : participation des acteurs dans le programme de recherche participative FARMSCAPE.**

De manière synthétique, les agriculteurs sont intervenus à plusieurs moments dans ce programme (Carberry *et al.*, 2002a) :

- dans un premier temps, ils ont pu tester les performances du modèle « culture » APSIM, avec l'aide de chercheurs, grâce aux valeurs mesurées sur des essais conduits dans leurs champs, ou à partir de leurs expériences portant sur leurs systèmes de culture habituels. Cette étape leur a permis de tester la crédibilité du modèle de manière à lui accorder leur confiance par la suite. Elle a également permis aux chercheurs d'approfondir leurs connaissances sur le comportement de certaines cultures (Robertson *et al.*, 2000) ou sur le devenir des fertilisants (Foale *et al.*, 2004) dans des situations pédoclimatiques spécifiques.
- dans un deuxième temps, les participants ont utilisé la simulation (avec l'aide de chercheurs) pour connaître les conséquences d'options alternatives de conduite de leur système de culture, en posant des questions du type « que se passerait-il si ... ? » (« what ... if ») (ex : que se passerait-il si je semais plus tard ?). Le modèle a donc été un moyen pour les agriculteurs, d'explorer leur propre système de production d'une manière équivalente à l'apprentissage qu'ils auraient pu avoir avec des expérimentations de terrain. Cette étape a été l'occasion de nouvelles discussions avec les chercheurs.

Carberry *et al.* (2002a) notent également que les agriculteurs les plus intéressés par ce programme ont été ceux qui envisageaient le changement de leur système de culture ou ceux qui cherchaient des moyens d'améliorer leurs décisions de conduite. En revanche, comme on pouvait s'attendre, les agriculteurs satisfaits par leurs pratiques (et dont le modèle montrait qu'elles étaient proches de l'optimum) étaient moins intéressés.

➤ Exemple 4 : « la modélisation participative »

Le concept de modélisation participative est discuté par Thornton et Herrero (2001) dans le cadre du couplage de modèles de culture et d'élevage. Cette démarche a pour objectif de favoriser l'utilisation de ces modèles intégrés par les agriculteurs ou leurs conseillers. Thornton et Herrero notent en effet que les cas d'adoption des modèles d'aide à la décision reposent généralement sur une approche participative où les acteurs font partie intégrante du processus d'élaboration. Cependant, ils ne considèrent pas que l'adoption des stratégies modélisées soit nécessairement liée à la diffusion et à l'utilisation de modèles numérisés, mais plutôt à la prise en compte de leurs données de sorties (*i.e.* les résultats simulés par le modèle).

Pour Thornton et Herrero (2001), la modélisation participative consiste à la fois à utiliser des modèles et à intégrer des méthodes participatives. La participation des acteurs doit avoir lieu à tous les stades du développement du modèle, et notamment aux derniers stades de sélection des stratégies de conduite de l'exploitation et de diffusion.

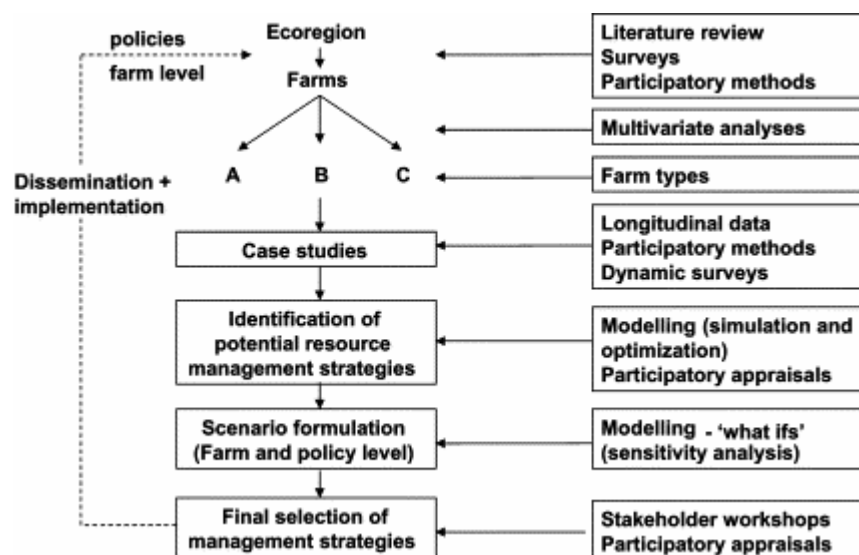


Figure 2 : méthodologie de la 'modélisation participative' proposée par Thornton et Herrero (2001).

Cette méthode consiste en premier lieu à sélectionner des fermes représentatives de la zone d'étude, puis à y effectuer des expérimentations et un suivi des activités et des pratiques de l'agriculteur et de la performance économique de l'exploitation. Des analyses *ex ante* des stratégies alternatives testées peuvent ensuite être conduites en tenant compte des objectifs de l'agriculteur et de son attitude vis-à-vis du risque. Les résultats sont ensuite discutés avec les acteurs lors de « séminaires participatifs » en vue d'identifier les stratégies à tester sur le terrain. Les acteurs peuvent être des agriculteurs, des conseillers ou l'administration locale. Une fois que des stratégies de conduite appropriées ont été sélectionnées, elles peuvent être diffusées au niveau des exploitations, avec l'aide des agriculteurs de fermes pilote et au niveau politique. La diffusion des stratégies sélectionnées à l'aide de modèles sera détaillée dans la partie suivante.

Dans cette approche, les agriculteurs sont certes impliqués dans la démarche de modélisation, mais ils ne participent pas à l'élaboration du modèle.

Un exemple d'application de cette méthode est donné par Waithaka *et al.* (2006) dont l'objectif est de concevoir des systèmes de production viables au Kenya, répondant aux objectifs des agriculteurs. Il faut noter que cette étude a la particularité de combiner la modélisation participative à la méthode du prototypage. Dans ce cas, les prototypes ne sont pas directement testés dans des fermes expérimentales, mais évalués *ex ante* par le modèle.

➤ **Exemple 5 : participation des acteurs dans les méthodes s'intéressant aux processus de décision des agriculteurs**

Ce type d'approche est fortement dépendant de la participation des agriculteurs, qui sont chargés d'explicitier les façons dont ils gèrent techniquement leurs productions et leurs ressources productives. Ces données servent à l'élaboration du modèle conceptuel représentant leurs décisions techniques, afin d'établir un « modèle d'action », selon le concept défini par Sebillotte et Soler (1988).

Récemment Vayssières *et al.* (2007) ont conduit une étude visant à la construction participative d'un modèle de simulation dynamique du fonctionnement de l'élevage en exploitations laitières à la Réunion. Ici la démarche participative intervient à tous les stades de la modélisation, depuis la conception du modèle décisionnel jusqu'à son utilisation, en passant par son évaluation et son amélioration, (Vayssières *et al.*, 2007). Toutefois, les agriculteurs ne participent pas à l'élaboration du module biotechnique du modèle, couplé au module décisionnel.

Synthèse sur la place des acteurs dans le processus de conception

Les acteurs, agriculteurs ou conseillers, peuvent donc participer à plusieurs niveaux dans le processus de conception, notamment :

- dans la définition des objectifs et des contraintes,
- dans le paramétrage du système, en fournissant des indications sur leurs exploitations qui seront utilisées comme données d'entrée du modèle,
- dans la modélisation du système, en explicitant leur processus de décisions qui permettra d'établir un modèle d'action conceptuel qui sera ensuite éventuellement numérisé,
- dans le choix des systèmes innovants proposés qui seront testés,
- dans la mise en œuvre des systèmes sélectionnés,
- dans l'utilisation de systèmes d'aide à la décision,
- dans l'évaluation des systèmes, en proposant des critères d'évaluation et des indicateurs.

C/ L'accompagnement des acteurs et l'aide à la décision

Les approches mentionnées pour l'accompagnement des acteurs concernent surtout l'apprentissage (Hagmann et Chuma, 2002) et l'aide à la décision (Donnelly *et al.*, 2002). On peut noter la forte différence qui existe à ce sujet entre les systèmes d'aide à la décision mis au point par des organismes de recherche, où l'accompagnement des acteurs est généralement faible, et ceux des instituts techniques qui ont pour vocation de les diffuser largement (voir par exemple leurs sites internet). Toutefois il existe aussi des cas d'outil d'aide à la décision mis au point par des chercheurs, et utilisés par la suite pour le conseil (ex : Bergez *et al.*, 2001 ; Heard *et al.*, 2004). On peut par ailleurs noter que les outils des Instituts Techniques sont surtout des outils d'aide au pilotage utilisables directement par les agriculteurs ou leurs conseillers (ex : Herbo-LIS® d'Arvalis – Institut du Végétal), alors que ceux de la recherche sont davantage axés sur un niveau stratégique (ex : les logiciels Otelo (Attonaty *et al.*, 1991) et Olympe (Penot *et al.*, 2004)).

Cependant, on peut noter qu'aux Etats-Unis, Savory a mis au point une méthode au niveau stratégique nommée « gestion holistique » qui n'a pas fait l'objet de publication dans des revues internationales, mais qui a été publiée dans un livre (Savory et Butterfield, 1999). Elle peut être utilisée par les agriculteurs eux-mêmes, après une formation dans un organisme privé 'le Centre International de Gestion Holistique'. La méthode a pour objectif de concevoir des systèmes agricoles durables (prenant en compte les 3 aspects environnemental, économique et social) en utilisant au mieux les ressources naturelles, et elle consiste à imiter les relations existant dans les écosystèmes naturels. Elle est détaillée en annexe 5.

En ce qui concerne l'apprentissage des acteurs, il est favorisé lorsque des approches participatives sont mises en place (Bonny *et al.*, 2005). Plusieurs auteurs ont également mis en avant le rôle joué par les modèles comme un outil favorisant l'apprentissage des acteurs (Carberry *et al.*, 2002a ; Duru et Hubert, 2003), c'est-à-dire l'acquisition de nouveaux savoirs ou de nouvelles compétences. Mais pour cela, il faut organiser l'interaction entre chercheurs et agriculteurs autour du modèle, comme cela a par exemple été le cas dans l'expérience FARMSCAPE.

Mais beaucoup d'études où la conception est basée sur des modèles numérisés s'intéressent peu à la démarche d'accompagnement des agriculteurs, qui sont seulement vus comme des utilisateurs potentiels de ces modèles (ex : Herrero *et al.*, 1999 ; Duru *et al.*, 2007). Beaucoup d'articles concluent en effet sur la manière dont leur modèle pourrait être utilisé par les agriculteurs ou leurs conseillers, sans pour autant donner d'exemple d'utilisation effective du modèle. Par exemple, après la présentation de leur modèle capable de simuler les effets de la diversité du territoire et des pratiques de gestion du pâturage et des stocks fourragers sur l'utilisation du territoire (Andrieu *et al.*, 2007a), Andrieu *et al.* (2007b) donnent des indications sur la manière dont ce modèle pourrait être utilisé par des conseillers pour tester différents scénarios croisant milieux et pratiques à l'échelle de l'exploitation d'élevage, mais qui restent hypothétiques.

Par ailleurs, le fait que les acteurs participent à la méthode de conception ne signifie pas que l'accompagnement va être important, comme le montrent les 2 exemples ci-dessous, illustrant l'accompagnement dans les méthodes du prototypage et de la modélisation participative.

➤ Exemple 1 : « accompagnement dans la méthode du prototypage »

Dans la méthode du prototypage, passée la quatrième étape de finalisation du prototypage, l'accompagnement des agriculteurs est peu évoqué. La phase de diffusion du prototype doit s'appuyer d'après Vereijken (1997) sur un transfert progressif de la supervision, des chercheurs vers les conseillers. Pour cela, il propose d'augmenter graduellement l'implication de conseillers dans les projets d'innovation.

Oenema *et al.* (2001) (cf étude discutée plus haut) proposent une diffusion des prototypes basée sur le 'coaching' des agriculteurs (de moins en moins intensif à mesure que l'on passe du cercle restreint des agriculteurs des fermes pilotes à celui plus large des autres agriculteurs de la zone d'étude) et sur le transfert des connaissances (via les agriculteurs de fermes pilotes pour lesquels l'accompagnement a été important ou via des articles dans des revues spécialisées). Cependant Langeveld *et al.* (2005) constatent que si les pratiques des agriculteurs ont effectivement été améliorées dans les fermes pilotes, elles ont subi peu de modifications dans les exploitations de la zone d'étude ne faisant pas partie du projet.

➤ Exemple 2 : « accompagnement dans la modélisation participative »

Dans la méthodologie de modélisation participative de Thornton et Herrero (2001) présentée plus haut, la diffusion des stratégies sélectionnées à l'aide de modèles est considérée au niveau des exploitation et au niveau politique. Au niveau de l'exploitation, des fermes pilotes peuvent servir de 'fermes de démonstration' pour montrer l'impact des stratégies choisies. Thornton et Herrero considèrent que les groupes d'agriculteurs et les conseillers de la zone étudiée jouent un rôle clé dans la diffusion des résultats à travers des activités de groupe ou des formations. Ils proposent également de diffuser les stratégies en utilisant des bulletins, des plaquettes, ou d'autres média.

A un niveau plus agrégé, l'analyse bioéconomique des stratégies sélectionnées peut être utilisée pour aider l'administration locale à choisir des actions prioritaires pour leur politique de développement au niveau régional. La dernière étape de la phase de diffusion est le suivi des résultats et des impacts des stratégies, une fois qu'elles ont été mises en œuvre au niveau de l'exploitation ou au niveau politique. Les acteurs peuvent alors examiner si les objectifs visés ont bien été atteints. La mise en œuvre de la méthodologie devient alors cyclique : lorsque certains paramètres (climat, prix, ...) sont modifiés, les modèles sont à nouveau utilisés pour définir les adaptations à réaliser, les stratégies sont discutées et sélectionnées par les acteurs, réalisées sur le terrain, évaluées et ainsi de suite.

D/ Le degré de formalisation du système

La place tenue par la formalisation du système de production a également été précisée pour chacune des 122 références de la base de données (tableau 2), en distinguant trois cas de figure :

1. Absence de modélisation : 9 références.

Sous cette catégorie ont été regroupées les études qui ne comportent pas une représentation conceptuelle du système de production (ou de ses composantes). Il s'agit par exemple d'études approchant le système de production agricole avec une vision écologique, c'est-à-

dire en le considérant comme un écosystème, prenant en compte par exemple les interactions entre proies et prédateurs pour lutter contre les ravageurs, mais sans les formaliser. C'est le cas notamment de Savory et Butterfield (1999) qui décrivent une méthode basée sur une vision holistique du système de production agricole, mise au point par Savory et qui reste assez empirique (cf annexe 5). Un autre type de vision de l'exploitation est proposé par Bloksma et Struik (2007) qui utilisent la santé humaine comme une métaphore de la « santé de l'exploitation ».

Il est à noter que les très nombreux travaux purement analytiques, décrivant des systèmes de production contextualisés, ne relevaient pas de notre analyse.

2. Modélisation sous forme conceptuelle : 12 références.

Sous cette catégorie on retrouve les références décrivant le système de production ou ses composantes au moyen d'un modèle conceptuel mais qui n'a pas été numérisé pour aboutir à un modèle informatique ou un logiciel. C'est le cas par exemple d'Aubry *et al.* (1998) qui modélisent l'organisation du travail pour la sole de blé d'hiver dans des exploitations de grande culture en Picardie, et de Madelrieux *et al.* (2006) qui modélisent l'organisation du travail dans des exploitations d'élevage.

3. Modélisation sous forme numérisée (modèle informatique) : 101 références.

La base de données contient une grande majorité d'études (101/122) s'appuyant sur un modèle numérisé. La partie suivante du rapport est donc consacrée à la conception « assistée par modèle ».

Tableau 2 : Distribution des références selon le type de modélisation et suivant l'échelle d'étude.

Les références soulignées indiquent les études couplant différents types de modèles (indications dans le texte)

Echelle		Parcelle / Troupeau	Composantes techniques de l'exploitation (atelier, sole)	Exploitation
Type de modélisation				
Absence		Bonny <i>et al.</i> , 2005 Cardoso <i>et al.</i> , 2001 Hagmann et Chuma, 2002 Stilma <i>et al.</i> , 2007		Bloksma et Struik, 2007 Hill <i>et al.</i> , 1999 Jordan <i>et al.</i> , 1997 Savory et Butterfield, 1999 Vereijken, 1997
Conceptuel			Aubry <i>et al.</i> , 1998 Dounias <i>et al.</i> , 2002 Madelrieux <i>et al.</i> , 2006 Meot <i>et al.</i> , 2003	Abt <i>et al.</i> , 2005 Aubry <i>et al.</i> , 2006 Coquil <i>et al.</i> , 2007 de Koeijer <i>et al.</i> , 1999 Dorward <i>et al.</i> , 2003 Duru et Hubert, 2003 Hilhorst <i>et al.</i> , 2001 Navarrete et Le Bail, 2007
Informatique	O P T I M I S A T I O N			Agbonlahor <i>et al.</i> , 2003 Alvarez <i>et al.</i> , 2004 Bernet <i>et al.</i> , 2001 Berntsen <i>et al.</i> , 2003 Blazy <i>et al.</i> , 2007 Bosma <i>et al.</i> , 1999 Cabrera <i>et al.</i> , 2005 Cabrera <i>et al.</i> , 2006 Castelan-Ortega <i>et al.</i> , 2003a Castelan-Ortega <i>et al.</i> , 2003b de Buck <i>et al.</i> , 1999 Dogliotti <i>et al.</i> , 2004 Dogliotti <i>et al.</i> , 2005 Dogliotti <i>et al.</i> , 2006 Ekman, 2005 Flaten et Lien, 2007 Gibbons <i>et al.</i> , 2005 Herrero <i>et al.</i> , 1999 Kassie <i>et al.</i> , 1999 Louhichi <i>et al.</i> , 2004 Musschoff et Hirschauer, 2007 Recio <i>et al.</i> , 2003 Rossing <i>et al.</i> , 1997 Sanchez-Giron <i>et al.</i> , 2007 Schiere <i>et al.</i> , 1999 Sharifi et Van Keulen, 1994 Stonehouse <i>et al.</i> , 2002 Torkamani, 2005 Val-Arreola <i>et al.</i> , 2006 Val-Arreola <i>et al.</i> , 2005 Val-Arreola <i>et al.</i> , 2004 van de Ven <i>et al.</i> , 2003 van de Ven et van Keulen, 2007 Veyssset <i>et al.</i> , 2005 Waithaka <i>et al.</i> , 2006 White <i>et al.</i> , 2005 Yiridoe <i>et al.</i> , 2006 Zhong <i>et al.</i> , 2004
	S I M U L A T I O N	Andales <i>et al.</i> , 2006 Ascough <i>et al.</i> , 2007 Bergez <i>et al.</i> , 2004 Carberry <i>et al.</i> , 2002a Carberry <i>et al.</i> , 2002b Chatelin <i>et al.</i> , 2005 Foale <i>et al.</i> , 2004 Huth <i>et al.</i> , 2002 Loyce <i>et al.</i> , 2002 Robertson <i>et al.</i> , 2000 Tixier <i>et al.</i> , 2008	Attonaty <i>et al.</i> , 1991 Barioni <i>et al.</i> , 1999 Bergez <i>et al.</i> , 2001 Cros <i>et al.</i> , 2001 Cros <i>et al.</i> , 2003 Dobos <i>et al.</i> , 2004 Dobos <i>et al.</i> , 2001 Donnelly <i>et al.</i> , 2002 Dowle <i>et al.</i> , 1988 Doyle et Edwards, 1986 Duru <i>et al.</i> , 2007 Gassman <i>et al.</i> , 2006 Heard <i>et al.</i> , 2004 Kerr <i>et al.</i> , 1999 Labbé <i>et al.</i> , 2000 Romera <i>et al.</i> , 2004 Rowe <i>et al.</i> , 2006 Sadras <i>et al.</i> , 2003 Seppelt, 1999 Snow et Lovatt, 2008 Sorensen <i>et al.</i> , 2005	Aarts <i>et al.</i> , 2000a Aarts <i>et al.</i> , 2000b Abegaz <i>et al.</i> , 2007 Andrieu <i>et al.</i> , 2007 Andrieu <i>et al.</i> , 2007 Brown <i>et al.</i> , 2005 Buysse <i>et al.</i> , 2005 Cabrera <i>et al.</i> , 2007 Cacho <i>et al.</i> , 1995 Coleno <i>et al.</i> , 2002 Defoer <i>et al.</i> , 1998 Groot <i>et al.</i> , 2006 Groot <i>et al.</i> , 2003 Guerrin, 2001 Lewis et Tzilivakis, 2000 Milne et Sibbald, 1998 Modin-Edman <i>et al.</i> , 2007 Oenema <i>et al.</i> , 2001 Olesen <i>et al.</i> , 2006 Penot et Feintrenie, 2005 Pfister <i>et al.</i> , 2005 Robertson et Wang, 2004 Rotz <i>et al.</i> , 1999 Rotz <i>et al.</i> , 2006 Schils <i>et al.</i> , 2005 Schils <i>et al.</i> , 2007 Shalloo <i>et al.</i> , 2004 Stoorvogel <i>et al.</i> , 2004 Vayssières <i>et al.</i> , 2008 Vayssières <i>et al.</i> , 2007 Weiske <i>et al.</i> , 2006

3.3. De l'usage des modèles

Comme indiqué précédemment, **101 références** (sur 122) sont des études ayant utilisé un modèle numérisé et 12 un modèle purement conceptuel. La modélisation constitue donc un outil important dans la conception et l'aide à la conception de systèmes de production agricole innovants.

Atouts et limites des modèles

Les modèles numérisés présentent de nombreux avantages et notamment (voir *e.g.* Sterk *et al.*, 2006 ; Ahuja *et al.*, 2007) :

- ils intègrent les connaissances dans les multiples disciplines étudiant les systèmes de production agricole ;
- ils donnent des indications chiffrées sur les phénomènes de compensation entre différents objectifs (par ex. environnementaux et économiques) ;
- ils permettent de comprendre des résultats en expliquant les processus sous-jacents ;
- une fois correctement paramétrés, ils permettent de tester des systèmes de production dans une large gamme de conditions (sol, climat, ...) inaccessibles à l'expérimentation, et dans un délai relativement court. Ils permettent donc d'évaluer de manière *ex ante* de multiples scénarios, et d'explorer la sensibilité des résultats au climat ou à une évolution du contexte ;
- ils permettent de passer du contextuel au générique (dans un souci de transfert des connaissances et des méthodes).

Cependant, l'utilisation des modèles comporte également certaines limites (voir *e.g.* Loyce et Wéry, 2006 ; Sterk *et al.*, 2006) :

- leur domaine de validité peut être limité pour certaines innovations n'ayant pas encore ou peu fait l'objet d'une modélisation ou d'une prise en compte dans les modèles (ex : pression des bioagresseurs, travail simplifié du sol, association de cultures),
- ils demandent pour leur calibration des paramètres, plus ou moins facilement quantifiables,
- ils nécessitent une adaptation à chaque système de production, qui peut se révéler assez lourde en terme de moyens.

Synthèse sur la conception assistée par modèle

Les modèles informatiques peuvent être utilisés à plusieurs niveaux pour aider à la conception de systèmes de production innovants :

- lors de la phase de conception proprement dite, pour créer de nouveaux systèmes,
- lors de la phase d'évaluation du système : soit avant sa mise en œuvre sur le terrain (il s'agit alors d'une évaluation *ex ante*), soit pour évaluer des systèmes testés en ferme expérimentale (évaluation *ex post*),
- dans la phase d'extrapolation des résultats : pour évaluer les systèmes sélectionnés dans d'autres situations pédoclimatiques.
- dans la phase de diffusion : s'il s'agit d'un modèle d'aide à la décision opérationnel.

Généralement la phase de conception et la phase d'évaluation *ex ante* du système innovant sont réalisées dans la même étude, mais pas nécessairement avec les mêmes modèles.

L'utilisation de modèles pour « explorer » de nouveaux systèmes innovants à l'échelle de l'exploitation avant leur mise en œuvre sur le terrain est une méthode nommée « modélisation exploratoire » (*explorative modelling* ou *goal-based farm modelling*, terme défini par Rossing *et al.*, 1997 ; Ten Berge *et al.*, 2002 ; Sterk, 2007). Ce type de modélisation peut être utilisé dans la méthode du prototypage, comme indiqué précédemment, ou dans les autres méthodes mobilisant des modèles. Rossing *et al.* (1997) l'utilisent par exemple pour explorer des options visant à concevoir des systèmes durables du point de vue environnemental pour la production de cultures florales. Afin de répondre aux multiples enjeux du développement durable, l'évaluation est de plus en plus basée sur une analyse multi-critères.

Ten Berge *et al.* (2000) ont identifié trois facteurs clé de réussite dans l'utilisation de la modélisation exploratoire pour la conception de systèmes innovants :

1. une mise au point rapide du modèle pour qu'il puisse être utilisé suffisamment tôt durant le processus de conception du système,
2. une prise en compte d'une gamme étendue de technologies innovantes dans les scénarios simulés,
3. l'implication des acteurs durant tout le processus de conception.

Sterk (2007) notent cependant que l'utilisation de la modélisation exploratoire pour la conception de systèmes innovants à l'échelle de l'exploitation reste encore assez limitée, et qu'elle gagnerait à impliquer le chercheur modélisateur de manière plus précoce dans le projet de conception.

Enfin, lorsque les modèles sont utilisés dans le cadre d'une approche participative, ils ont généralement un rôle bénéfique sur l'apprentissage des agriculteurs mais aussi des chercheurs, et sur les échanges d'idées entre chercheurs et agriculteurs (voir *e.g.* Rossing *et al.*, 1997 ; Attonaty *et al.*, 1999 ; Sterk *et al.*, 2006).

A/ Distribution des références par type de système modélisé

Quelle que soit l'approche de modélisation utilisée (optimisation ou simulation), elle va consister à modéliser un ou plusieurs des trois sous-systèmes constituant le système de production agricole (i.e. les systèmes biophysique, technique et décisionnel) (Le Gal *et al.*, 2007). Lorsque le système biophysique est modélisé à l'échelle de l'exploitation agricole ou de ses entités, c'est également le cas du système technique. Nous avons donc regroupé les sous-systèmes biophysique et technique en un seul système « biotechnique » dans le tableau 3.

Tableau 3 : Distribution des références entre les différents sous-systèmes de l'exploitation et suivant l'échelle d'étude

N.B. : les références utilisant un modèle conceptuel non numérisé sont soulignées ;
les références comportant une modélisation des trois systèmes (biophysique, technique et décisionnel) sont surlignées en jaune.

Echelle Système modélisé	Parcelle / Troupeau	Composantes techniques de l'exploitation Atelier / Sole	Exploitation
Biotechnique uniquement	Andales <i>et al.</i> , 2006 Ascough <i>et al.</i> , 2007	Dobos <i>et al.</i> , 2004 Dobos <i>et al.</i> , 2001 Donnelly <i>et al.</i> , 2002 Dowle <i>et al.</i> , 1988 Doyle et Edwards, 1986 Duru <i>et al.</i> , 2007 Gassman <i>et al.</i> , 2006 Heard <i>et al.</i> , 2004 Kerr <i>et al.</i> , 1999 Rowe <i>et al.</i> , 2006 Sadras <i>et al.</i> , 2003 Seppelt, 1999	Aarts <i>et al.</i> , 2000 Aarts <i>et al.</i> , 2000 Abegaz <i>et al.</i> , 2007 Agbonlahor <i>et al.</i> , 2003 Alvarez <i>et al.</i> , 2004 Bernet <i>et al.</i> , 2001 Berntsen <i>et al.</i> , 2003 Blazy <i>et al.</i> , 2007 Bosma <i>et al.</i> , 1999 Brown <i>et al.</i> , 2005 Buysse <i>et al.</i> , 2005 Cabrera <i>et al.</i> , 2005 Cabrera <i>et al.</i> , 2006 Cabrera <i>et al.</i> , 2007 Castelan-Ortega <i>et al.</i> , 2003 Castelan-Ortega <i>et al.</i> , 2003 de Koeijer <i>et al.</i> , 1999 Defoer <i>et al.</i> , 1998 Dogliotti <i>et al.</i> , 2004 Dogliotti <i>et al.</i> , 2005 Dogliotti <i>et al.</i> , 2006 Flaten et Lien, 2007 Gibbons <i>et al.</i> , 2005 Groot <i>et al.</i> , 2006 Groot <i>et al.</i> , 2003 Herrero <i>et al.</i> , 1999 Hilhorst <i>et al.</i> , 2001 Lewis et Tzilivakis, 2000 Louhichi <i>et al.</i> , 2004 Modin-Edman <i>et al.</i> , 2007 Oenema <i>et al.</i> , 2001 Olesen <i>et al.</i> , 2006 Pfister <i>et al.</i> , 2005 Robertson et Wang, 2004 Rossing <i>et al.</i> , 1997 Rotz <i>et al.</i> , 2006 Rotz <i>et al.</i> , 1999 Schiere <i>et al.</i> , 1999 Schils <i>et al.</i> , 2007 Schils <i>et al.</i> , 2005 Shalloo <i>et al.</i> , 2004 Sharifi et Van Keulen, 1994 Stonehouse <i>et al.</i> , 2002 Stoorvogel <i>et al.</i> , 2004 Val-Arreola <i>et al.</i> , 2004 Val-Arreola <i>et al.</i> , 2005 Val-Arreola <i>et al.</i> , 2006 van de Ven <i>et al.</i> , 2003 van de Ven et van Keulen, 2007 Veyssset <i>et al.</i> , 2005 Waithaka <i>et al.</i> , 2006 Weiske <i>et al.</i> , 2006 Zhong <i>et al.</i> , 2004
Technique uniquement		Sorensen <i>et al.</i> , 2005	Dorward <i>et al.</i> , 2003 Kassie <i>et al.</i> , 1999 Penot et Feintrenie, 2005 Torkamani, 2005 White <i>et al.</i> , 2005 Yiridoe <i>et al.</i> , 2006
Décisionnel +- biotechnique	Bergez <i>et al.</i> , 2004 Carberry <i>et al.</i> , 2002a Carberry <i>et al.</i> , 2002b Chatelin <i>et al.</i> , 2005 Foale <i>et al.</i> , 2004 Huth <i>et al.</i> , 2002 Loyce <i>et al.</i> , 2002 Robertson <i>et al.</i> , 2000 Tixier <i>et al.</i> , 2008	Attonaty <i>et al.</i> , 1991 Aubry <i>et al.</i> , 1998 Barioni <i>et al.</i> , 1999 Bergez <i>et al.</i> , 2001 Cros <i>et al.</i> , 2001 Cros <i>et al.</i> , 2003 Dounias <i>et al.</i> , 2002 Labbe <i>et al.</i> , 2000 Madelrieux <i>et al.</i> , 2006 Meot <i>et al.</i> , 2003 Romera <i>et al.</i> , 2004 Snow et Lovatt, 2008	Abt <i>et al.</i> , 2005 Andrieu <i>et al.</i> , 2007 Andrieu <i>et al.</i> , 2007b Aubry <i>et al.</i> , 2006 Cacho <i>et al.</i> , 1995 Coleno <i>et al.</i> , 2002 Coquil <i>et al.</i> , 2007 de Buck <i>et al.</i> , 1999 Duru et Hubert, 2003 Ekman, 2005 Guerrin, 2001 Milne et Sibbald, 1998 Muschhoff et Hirschauer, 2007 Navarrete et Le Bail, 2007 Recio <i>et al.</i> , 2003 Sanchez-Giron <i>et al.</i> , 2007 Vayssières <i>et al.</i> , 2007 Vayssières <i>et al.</i> , 2008

Les 122 références sont distribuées de la manière suivante :

- modélisation des systèmes biophysique et technique (=système biotechnique) mais pas du système décisionnel : 67 références
- modélisation du système technique uniquement : 7 références
- modélisation du système décisionnel (avec ou sans modélisation des systèmes biophysiques et techniques) : 39 références
- modélisation des 3 systèmes (biophysique + technique + décisionnel) : 29 références

On considère ici que le système décisionnel n'est modélisé que s'il décrit explicitement les règles de décision de l'agriculteur, ce qui exclut les modèles d'optimisation pour lesquels il existe bien une théorie de la décision (l'agriculteur en tant que décideur 'rationnel') mais qui est implicite. On considère par ailleurs que lorsque le système biophysique n'est représenté que sous la forme de données d'entrées saisies par l'utilisateur (comme le rendement ou la pluviométrie), il ne s'agit pas d'une véritable modélisation du système biophysique. C'est le cas par exemple du logiciel Olympe (Penot et Feintrenie, 2005) dont l'utilisateur fournit par exemple des données sur les prix des produits vendus ou achetées et sur les niveaux des productions.

On constate que le système décisionnel (39 références) est moins fréquemment modélisé que les systèmes biophysique et technique. Les modèles prenant en compte les 3 sous-systèmes biophysique, technique et décisionnel représentent moins du quart des études (29/122), ce qui peut être dû à la complexité du couplage entre les modèles biotechniques et décisionnels (cf Le Gal *et al.*, soumis), et à la non prise en compte du système décisionnel par la majorité des modèles bioéconomiques (d'optimisation). Des exemples sont donnés par la suite.

Les systèmes peuvent être modélisés de manière plus ou moins complexe. On distingue deux types de modélisation des systèmes : empirique ou mécaniste. Les **modèles empiriques** (ou « boîte noire ») se contentent de décrire les relations arithmétiques directes entre les variables d'entrée et de sortie. Ils ne font aucune référence aux connaissances sur les processus internes du système. Ce type de modèle, s'il donne des résultats généralement satisfaisants dans le cas étudié, ne permet pas l'extrapolation à des situations inconnues.

Les **modèles mécanistes** décrivent quant à eux les mécanismes internes du système, en se basant sur les connaissances (biologiques, physiques, ...) que l'on a sur les processus et qui sont traduites sous différentes formes : analytiques (équations), qualitatives ou symboliques (intégration de connaissances d'expert), ou multi-agent (INRA, 2005). Ces modèles nécessitent de nombreuses données d'entrée pour les paramétrer.

Les modèles dont le système biophysique est modélisé de manière mécaniste sont généralement des modèles à l'échelle de la culture (« *crop models*») comme par exemple le modèle APSIM. A l'échelle de l'exploitation (« *whole farm models* »), ils sont généralement empiriques, comme le modèle FarmGHG utilisé dans l'étude de Weiske *et al.* (2006) détaillée dans l'encadré ci-dessous.

L'étude de Weiske *et al.* (2006) s'inscrit dans le cadre des travaux sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre au moyen des « *whole farm models* », modèles agronomiques de simulation à l'échelle du système de production (Schils *et al.*, 2007 donnent une revue succincte de ces modèles).

Les auteurs utilisent le modèle de ferme « FarmGHG » mis au point par Olesen *et al.* (2006) pour explorer les stratégies permettant de réduire les émissions de gaz à effet d'exploitations laitières européennes. FarmGHG est un modèle empirique simulant les flux journaliers de C et d'N entre compartiments pour des fermes laitières (fig. 3). Ce modèle biotechnique a été construit dans l'objectif de quantifier l'effet des pratiques agricoles ou de stratégies de réduction ('mitigation options') sur les émissions de gaz à effet de serre (CO_2 , CH_4 et N_2O). Il prend en compte les consommations d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre provenant de l'exploitation, ainsi que celles liées aux intrants (« prechains »). Elles sont estimées à partir de facteurs d'émission empiriques selon les méthodologies de l'IPCC (IPCC, 1997) et pour certains processus non décrits par l'IPCC, selon une méthodologie propre à FarmGHG. Les émissions d'ammoniac et la lixiviation des nitrates sont également modélisées, mais pas les variations de stock de C dans les sols.

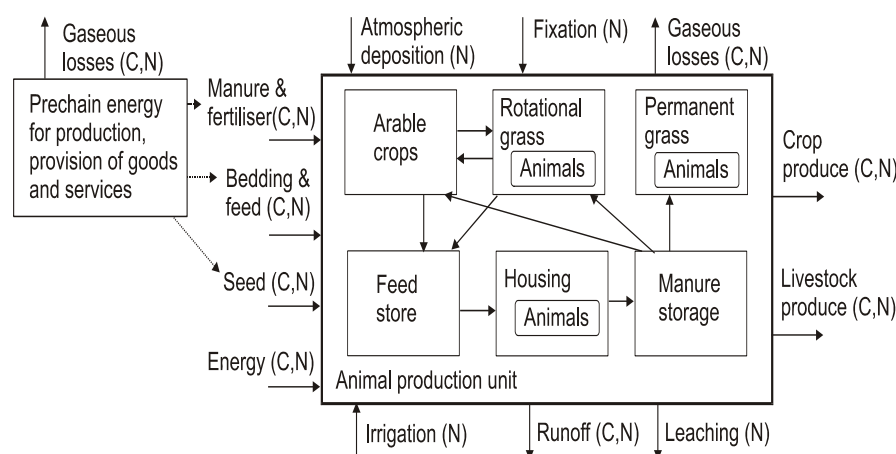


Figure 3 : structure du modèle FarmGHG (d'après Olesen *et al.*, 2006)

Les flèches représentent les flux de C et N

A partir de la bibliographie internationale sur les méthodes de réduction des émissions de gaz à effet de serre, Weiske *et al.* (2006) ont sélectionné les quatre options suivantes :

- 1/ une optimisation de la durée de vie (*lifetime efficiency*) des vaches laitières, en testant différents taux de renouvellement et de gestion des génisses ;
- 2/ un enlèvement fréquent des déjections et un raclage régulier du sol des bâtiments d'élevage ;
- 3/ la production de biogaz par digestion anaérobie des déjections en testant différents substrats de co-digestion ;
- 4/ des techniques améliorées d'épandage de lisier.

Ces options ont été évaluées sur 14 exploitations « modèles » (non réelles) typiques des différentes régions européennes, sept en agriculture conventionnelle et sept en agriculture biologique. Les résultats mettent en évidence des phénomènes de compensation entre polluants et entre compartiments, qui attestent de l'importance d'une évaluation des émissions de gaz à effet de serre à l'échelle de l'exploitation. Le modèle montre par exemple que le raclage régulier n'est pas une stratégie intéressante, car la réduction des émissions de gaz à effet de serre qu'il induit dans les bâtiments d'élevage est plus que compensée par l'augmentation des émissions sur le lieu de stockage et après l'épandage.

On notera que dans cette étude, il est considéré que les exploitations sont conduites de manière optimale ('operated by best management'). Par ailleurs, il n'est mentionné aucune participation des agriculteurs ou de leurs conseillers.

Modèle mécaniste ou empirique ?

Pour Rossing *et al.* (1997) et Mc Cown *et al.* (2002) un modèle utilisé pour la conception doit être mécaniste, notamment pour qu'il soit utilisable dans plusieurs contextes. Si une modélisation mécaniste permet d'évaluer précisément les impacts de stratégies innovantes sur des variables biophysiques ou économiques, elle est difficile à réaliser en raison du nombre important de données et de la connaissance du système qu'elle requiert (Le Gal *et al.*, soumis). Thornton et Herrero (2001) proposent pour leur part de ne modéliser de manière mécaniste que les processus et les composantes pour lesquels on a le plus d'informations (les autres étant modélisés de manière empirique). Pour ces auteurs, il faut trouver un compromis entre la précision requise, la flexibilité du modèle (=son adaptabilité à plusieurs situations) et le besoin en données d'entrée.

Le sous-système technique peut également être représenté de manière plus ou moins complexe : d'une simple description des dates de traitement et des quantités apportées (ex : Schils *et al.*, 2005) à une représentation détaillée de ses différentes composantes (ex : Sorensen *et al.*, 2005).

Concernant le sous-système décisionnel, sa modélisation consiste généralement en un corps de règles de décision (si condition alors action) qui déterminent les actes techniques à effectuer en fonction d'observations sur l'état courant de l'environnement (indicateurs), selon une démarche purement réactive, comme c'est le cas dans APSIM (Carberry *et al.*, 2002a). Elle peut être complétée par un plan qui assure la cohérence temporelle des activités. Dans le cas d'une modélisation du système décisionnel plus développée, le système de production est décomposé en unités de gestion autonomes et les règles de décision sont de plusieurs types : dimensionnement, ordonnancement, coordination (voir *e.g.* Andrieu, 2004 ; Vayssières *et al.*, 2007). Récemment, Snow et Lovatt (2008) ont proposé une nouvelle approche, basée sur la construction d'un arbre de décision, qui décrit toutes les décisions possibles jusqu'à un certain point dans le futur. Leur modèle ('GPAM=General Planner for Agro-ecosystem Models') évalue ensuite quel chemin dans l'arbre de décision donne le meilleur résultat, puis fournit ces décisions à un modèle de simulation qui les exécute.

On peut noter la prédominance des travaux conduits par des équipes françaises dans les études portant sur une modélisation du système décisionnel (24 études sur 39). La difficulté dans la modélisation des règles de décision d'un système de production agricole ou de ses composantes réside certainement dans la généricité qu'il faut essayer de conserver pour que le module décisionnel puisse être informatisé (dans le cas d'un modèle conceptuel comme celui de Navarrete et Le Bail, 2007) et transposable à d'autres exploitations que celles ayant servi à établir le modèle. Ainsi Vayssières *et al.* (2007) proposent une modélisation très détaillée du système de décision d'exploitations laitières de la Réunion, mais très contextualisé aux 6 exploitations pilote étudiées, ce qui limite son utilisation à d'autres exploitations d'élevage laitier. En revanche, comme présenté précédemment avec le modèle OTELO, Attonaty *et al.* (1991) ont proposé une méthode originale basée sur une formalisation générique et numérisée des règles de gestion des agriculteurs.

Dans notre base de références, 29 articles comportent à la fois une modélisation des systèmes biotechnique et décisionnel (références surlignées). Ce couplage dans un modèle numérisé permet de simuler des règles de décision et d'en évaluer les conséquences. C'est le cas par exemple du logiciel de pâturage tournant SEPATOU de Cros *et al.* (2001) qui peut simuler

par exemple la production végétale de la prairie en fonction de la date de mise à l'herbe des animaux, ou de Vayssières *et al.* (2008) dont le modèle GAMEDE peut simuler les flux de biomasse en fonction des pratiques de l'éleveur.

B/ Distribution par approche de modélisation

Deux grandes approches de modélisation informatique ont été distinguées : la simulation et l'optimisation. Les références comportant un modèle informatique ont été réparties selon l'une ou l'autre de ces approches dans le tableau 2.

La modélisation par **simulation** consiste à représenter un système par un jeu d'équations plus ou moins complexes pour décrire son fonctionnement, en prenant en compte ses interactions avec l'environnement (voir la revue de Cros *et al.*, 2006). Ce type de modélisation permet par exemple d'étudier les conséquences de scénarios de gestion sous différentes conditions de milieux sur des indicateurs agronomiques, économiques ou environnementaux. Dans notre base de références, 63 articles concernent des modèles de simulation. On trouve par exemple, des modèles de simulation du système biotechnique à l'échelle du système de production agricole (« *whole-farm model* ») qui se sont développés pour répondre à des problématiques environnementales (réduction des pertes en nitrate ou des émissions de gaz à effet de serre) car cette échelle d'étude permet de tenir compte des transferts de pollution d'un compartiment à l'autre à travers une vision globale du système étudié. C'est le cas notamment du modèle FarmGHG utilisé par Weiske *et al.* (2006) et présenté précédemment. Les modèles de simulation sont utilisés également pour modéliser le système de gestion des agriculteurs, comme dans les modèles OTELO (Attonaty *et al.*, 1991), SEPATOU (Cros *et al.*, 2001) ou GAMEDE (Vayssières *et al.*, 2008).

On trouve par ailleurs 2 études utilisant des simulateurs budgétaires (Shalloo *et al.* (2004) comme le logiciel OLYMPE (Penot et Feintrenie, 2005). Ce logiciel fournit une analyse économique de rentabilité en fonction des choix techniques et des types de production. Il peut simuler des scénarios de variation de prix et de quantités de produits vendus ou utilisés en fonction d'aléas climatiques ou conjoncturels. Enfin, un autre type d'utilisation de la simulation est décrit par Robertson et Wang (2004) dont le modèle basé sur les « réseaux bayésiens » a pour objectif d'aider les agriculteurs dans leur choix du système d'irrigation en analysant la prise de risque lors d'un changement du système d'irrigation au niveau de l'exploitation au moyen de différents indicateurs économiques, agronomiques ou environnementaux.

L'**optimisation** est la méthode de modélisation employée la plus fréquemment dans les modèles bio-économiques (voir la revue de Jannsen et Van Ittersum, 2007), la technique d'optimisation la plus utilisée étant la programmation linéaire, qui représente l'exploitation comme une combinaison linéaire d'activités. Une activité correspond à un ensemble cohérent d'opérations résultant par exemple dans la vente d'un produit, dans la restauration de la fertilité du sol, ou dans la production de fourrages (Jannsen et Van Ittersum, 2007). Une activité est caractérisée par un jeu de coefficients (coefficients techniques ou coefficient d'entrée-sortie) qui expriment la contribution de chaque activité à la réalisation d'objectifs définis, en terme de modélisation (voir aussi Ten Berge *et al.*, 2000). Comme les entrées sont en ressources limitées, les activités sont affectées de contraintes, qui représentent la quantité minimale ou maximale qui peut être utilisée. Ce système d'activités et de contraintes est alors optimisé pour une fonction objectif, qui reflète un objectif spécifié par l'utilisateur, par exemple le profit. L'optimisation peut avoir pour objectif de maximiser le profit, mais elle

peut également essayer de satisfaire des objectifs multiples, ce qui nécessite alors l'utilisation de méthodes multicritères d'aide à la décision comme le « *multiple-goal linear programming* » utilisé par exemple par Rossing *et al.* (1997). Dans notre base de références, 38 articles concernent des modèles bioéconomiques avec une approche d'optimisation. C'est le cas par exemple de l'étude de Dogliotti *et al.* (2005) présentée précédemment.

Ce type d'approche était à l'origine basé sur une vision plus bioéconomique que biotechnique de l'exploitation, mais plusieurs études (14 dans notre base de données) ont couplé un modèle de simulation avec le modèle d'optimisation. Ce type de couplage est réalisé par exemple dans les études de Castelan-Ortega *et al.* (2003a,b) et Gibbons *et al.* (2005) où les coefficients techniques de la programmation linéaire sont générés par un modèle de simulation biotechnique. Le couplage réalisé par Herrero *et al.* (1999) est plus complexe, le modèle de simulation reproduisant en amont différentes stratégies de décision, dont les résultats sont optimisés par un modèle d'optimisation multi-objectifs.

A l'inverse, six études ont voulu optimiser les résultats ou les paramètres de modèles de simulation. Il s'agit alors de comparer les résultats de différentes stratégies simulées par un modèle de simulation biophysique, couplé ou non avec un modèle décisionnel, à l'aide d'un « optimisateur » plus ou moins élaboré. C'est le cas notamment des études de Bergez *et al.* (2001 et 2004) pour optimiser les stratégies d'irrigation du maïs, et de Rowe *et al.* (2006) pour optimiser des stratégies de fertilisation en Afrique.

Enfin un troisième type de couplage consiste à utiliser la programmation linéaire pour optimiser un « plan d'action » (règles de décision ou assolement) dont les conséquences sont simulées avec un modèle de simulation. Dans ces cas-là, il devient difficile de trancher si le modèle est à la base un modèle d'optimisation ou de simulation. Ainsi le modèle FASSET utilisé par Berntsen *et al.* (2003) combine un module de programmation linéaire, générant un assolement optimal en fonction de différents critères, et un module de simulation dynamique, calculant à la fois les coefficients techniques de la programmation linéaire et les indicateurs économiques et environnementaux des assolements optimaux. Plus récemment Snow et Lovatt (2008) ont utilisé ce type de couplage avec un modèle de simulation empirique pour optimiser des règles de décision. Leur modèle décisionnel générique 'GPAM' évoqué précédemment, construit toutes les décisions possibles, qui sont ensuite introduites dans une fonction objectif de manière à définir le meilleur scénario, qui est simulé à l'aide d'un modèle de simulation. Leur approche a été appliquée à la gestion du pâturage tournant en le couplant avec un modèle de simulation du taux de croissance des animaux empirique, avec pour objectif d'optimiser la durée de rotation.

Modèle d'optimisation ou de simulation ?

Plusieurs auteurs ont comparé les intérêts et limites des modèles d'optimisation et de simulation (*e.g.* Stonehouse *et al.*, 2002 ; Cros *et al.*, 2004 ; Guerrin, 2007), mais leurs avis reflètent fortement leurs préférences en la matière, et il n'y a pas vraiment de consensus.

Une grande différence entre les 2 types de technique est la manière dont est représentée la décision de l'agriculteur (voir *e.g.* Janssen et Van Ittersum, 2007). Le modèle d'optimisation voit la décision de l'agriculteur comme dépendant de buts multiples et variés (économiques, environnementaux) et statique, alors que dans le modèle de simulation, la décision de l'agriculteur est dépendante du milieu biophysique et donc dynamique. Dans les modèles d'optimisation, l'aspect organisationnel de la production au sein de l'exploitation est donc peu

pris en compte, et la stratégie optimisée n'est pas toujours réalisable. Pour contourner cette limite, certains auteurs ont couplé à cette démarche d'optimisation une simulation qui reproduit en amont différentes stratégies de décision (*e.g.* Herrero *et al.*, 1999).

Remarque sur la prise en compte d'aspects économiques par les modèles :

La prise en compte des aspects économiques (marges, profit, ...) constitue une composante importante des modèles bioéconomiques utilisant la programmation mathématique et basés sur une optimisation d'une fonction de production (ex : Louhichi *et al.*, 2004), et des simulateurs budgétaires comme Olympe (Penot et Feintrenie, 2005), alors qu'il ne s'agit que d'un simple calcul des coûts-bénéfices pour les modèles de simulation biotechniques (ex : Rotz *et al.*, 2006). La base de données comporte 69 références indiquant une prise en compte d'éléments économiques.

C/ Distribution par type d'usage

On a distingué le modèle en tant qu'outil d'exploration pour la recherche, du modèle comme système d'aide à la conception ou à la décision pour le développement (conseillers, agriculteurs).

- Outil de recherche : 48 références
- Outil de développement : 95 références
- Outil de recherche et de développement : 22 références

Certaines études avancent le fait que leur modèle peut être utilisé à la fois pour faire progresser les connaissances dans le domaine de la recherche, et comme outil d'aide à la conception ou à la décision pour les agriculteurs ou leurs conseillers (ex : Cabrera *et al.*, 2005 ; Chatelin *et al.*, 2007). Cependant Rossing *et al.* (2007) pensent qu'un modèle utilisé pour la recherche peut se révéler inapproprié pour les acteurs (agriculteur, conseiller ou politique) en raison de sa complexité, de la non prise en compte de certains phénomènes ou des coûts qui sont liés à l'utilisation du modèle. Un modèle destiné au développement doit également être réfléchi au niveau ergonomique (convivialité, interfaces graphiques, ...).

4. Discussion – conclusions

Ce travail bibliographique basé sur la littérature scientifique publiée dans des revues internationales à comité de lecture, montre beaucoup d'études décrivant la mise au point d'une méthode de conception ou d'un système d'aide à la décision. Certaines de ces études décrivent l'application de la méthode proposée chez quelques agriculteurs faisant partie du projet. Mais la base de références établie dans ce travail montre peu d'exemples concrets d'utilisation de méthodes de conception par des agriculteurs ou par leurs conseillers pour construire des systèmes innovants. Cela peut provenir de la nature des références consultées, ces travaux faisant peut-être l'objet de publications dans la littérature grise. Cela pourrait également provenir des outils ou des méthodes de conception proposés par les chercheurs. Ces outils semblent généralement trop complexes pour être utilisés directement par des conseillers agricoles ou par des agriculteurs. En effet, les études des chercheurs s'intéressent généralement au niveau stratégique de la gestion de l'exploitation, et les outils mis au point sont donc plus complexes que ceux conçus pour le niveau opérationnel de prise de décisions, comme le sont les nombreux outils proposés par les instituts techniques.

Il manquerait donc un lien entre le travail des chercheurs, aboutissant à la mise au point d'un outil ou d'une méthode d'aide à la conception et leur utilisation par leurs cibles (agriculteurs ou conseillers, voire politiques). C'est le cas même dans les études utilisant des approches participatives comme le programme FARMSCAPE, car si les agriculteurs semblent fortement intéressés par l'outil de modélisation durant le programme, une fois le projet terminé, ils ne peuvent pas utiliser eux-mêmes le modèle, dont l'apprentissage reste difficile même pour les conseillers. De manière générale, dans les références consultées pour ce travail, l'étape de diffusion du système d'aide à la décision est souvent réduite à sa plus simple expression (les agriculteurs de la zone d'étude discutent avec les agriculteurs qui ont fait partie du projet ...).

Par ailleurs, les études basées sur des modèles bioéconomiques qui recherchent une combinaison optimale de techniques pour atteindre un ou plusieurs objectifs, ne prennent généralement pas en compte la mise en œuvre de ces techniques dans l'exploitation (*i.e.* le système décisionnel de l'exploitation), ce qui soulève des questions quant à leur utilisation possible en conseil.

En conclusion, malgré les nombreux travaux menés sur la conception de systèmes agricoles innovants notamment à l'aide de modèles, peu d'études montrent l'utilisation effective de systèmes d'aide à la conception par leur principale cible, à savoir les agriculteurs ou leurs conseillers. Ainsi Langensiepen écrit en 2007 *"Today, however, the broad application of modelling in agricultural decision support and systems design is still more a vision than a reality."*

En 2001, Keating et Mc Cown indiquaient que le challenge dans les 10 ans à venir n'était pas de mettre au point des modèles plus précis ou plus complets, mais de trouver de nouvelles façons d'être utiles aux agriculteurs pour leur prise de décision et pour leurs pratiques de conduite. Ce défi semble toujours d'actualité.

Pour améliorer l'utilisation des outils d'aide à la conception par la profession agricole, il semble important de travailler sur les points suivants :

- une meilleure description des processus de décision de l'agriculteur et sa prise en compte dans les modèles à l'échelle de l'exploitation,
- une plus grande association des agriculteurs à la conception, de préférence dès le début du processus,
- une plus grande généricité de modèles, pour une adaptation plus simple et plus rapide au contexte étudié, avec la possibilité d'ajouter ou de retirer facilement certains modules,
- une adaptation des systèmes d'aide à la décision basés sur des modèles à leurs futurs utilisateurs et un accompagnement des acteurs.

Par ailleurs, il serait également utile de réfléchir à la prise en compte de certaines innovations complexes difficilement modélisables (ex : lutte intégrée contre les bioagresseurs, systèmes de cultures associées et/ou sur couvert permanent, ...).

Enfin, tout ce travail de conception et de compréhension du fonctionnement des exploitations agricoles doit être replacé dans son contexte naturel et socio-économique, notamment pour évaluer la pertinence et l'opportunité de l'innovation.

*
* *

REFERENCES

Références de la base de données de l'étude (intitulée Design_cas) :

- Aarts H.F.M., Habekotte B., van Keulen H. (2000a) Nitrogen (N) management in the 'De Marke' dairy farming system, *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 56, 231-240.
- Aarts H.F.M., Habekotte B., van Keulen H. (2000b) Phosphorus (P) management in the 'De Marke' dairy farming system, *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 56, 219-229.
- Abegaz A., van Keulen H., Oosting S.J. (2007) Feed resources, livestock production and soil carbon dynamics in Teghane, Northern Highlands of Ethiopia, *Agric. Syst.* 94, 391-404.
- Abt V., Pierreval H., Vigier F., Bignon J.B., Durand C. (2005) Modélisation d'entreprise et secteur agricole : modélisation d'une exploitation d'élevage, in: (Eds.), 6^e congrès international de génie industriel. Besançon (France), pp. 9.
- Agbonlahor A.U., Aromolaran A.B., Aiboni V.I. (2003) Sustainable soil management practices in small farms of southern Nigeria: A poultry-food crop integrated farming approach, *J. Sustain. Agric.* 22, 51-62.
- Alvarez J.F.O., Valero J.A.D., Martin-Benito J.M.T., Mata E.L. (2004) MOPECO: an economic optimization model for irrigation water management, *Irrig. Sci.* 23, 61-75.
- Andales A.A., Derner J.D., Ahuja L.R., Hart R.H. (2006) Strategic and Tactical prediction of forage production in northern mixed-grass prairie, *Rangel. Ecol. Manag.* 59, 576-584.
- Andrieu N., Poix C., Josien E., Duru M. (2007a) Simulation of forage management strategies considering farm-level land diversity: Example of dairy farms in the Auvergne, *Comput. Electron. Agric.* 55, 36-48.
- Andrieu N., Bonhomme M., Duru M., Poix C. (2007b) FDMS, farmland diversity and forage production unit management simulator, *Comput. Electron. Agric.* 59, 86-89.
- Ascough J.C., McMaster G.S., Andales A.A., Hansen N.C., Sherrod L.A. (2007) Evaluating GPFARM crop growth, soil water, and soil nitrogen components for Colorado dryland locations, *Trans. ASABE* 50, 1565-1578.
- Attonaty J.M., Maxime F., Soler L.G. (1991) Aid for strategic management of farms : a proposed knowledge based simulation model, in: EAAE E.A.o.A.E. (Eds.), Congrès Européen des Economistes Agricoles : Economics and artificial intelligence in agriculture. Bruxelles (BEL), pp. 10.
- Aubry C., Paillat J.-M., Guerrin F. (2006) A conceptual representation of animal waste management at the farm scale: The case of the Reunion Island, *Agric. Syst.* 88, 294-315.
- Aubry C., Papy F., Capillon A. (1998) Modelling decision-making processes for annual crop management, *Agric. Syst.* 56, 45-65.
- Barioni L.G., Dake C.K.G., Parker W.J. (1999) Optimizing rotational grazing in sheep management systems, *Environ. Int.* 25, 819-825.
- Bergez J.E., Debaeke P., Deumier J.M., Lacroix B., Leenhardt D., Leroy P., Wallach D. (2001) MODERATO: an object-oriented decision tool for designing maize irrigation schedules, *Ecol. Model.* 137, 43-60.
- Bergez J.E., Garcia F., Lapasse L. (2004) A hierarchical partitioning method for optimizing irrigation strategies, *Agric. Syst.* 80, 235-253.
- Bernet T., Ortiz O., Estrada R.D., Quiroz R., Swinton S.M. (2001) Tailoring agricultural extension to different production contexts: a user-friendly farm-household model to improve decision-making for participatory research, *Agric. Syst.* 69, 183-198.
- Berntsen J., Petersen B.M., Jacobsen B.H., Olesen J.E., Hutchings N.J. (2003) Evaluating nitrogen taxation scenarios using the dynamic whole farm simulation model FASSET, *Agric. Syst.* 76, 817-839.
- Blazy J.M., Carpentier A., Ozier-Lafontaine H., Thomas A., Tixier P., Wery J. (2007) Integrated *ex ante* assessment of agro-management innovations by combining crop, farm and adoption models, in: Donatelli M., Hatfield J., Rizzoli A. (Eds.), *Farming System*

- Design 2007, Int. Symposium on Methodologies on Integrated Analysis on Farm Production Systems. Catania (Italy), pp. 17-18.
- Bloksma J.R., Struik P.C. (2007) Coaching the process of designing a farm: using the healthy human as a metaphor for farm health, *NJAS-Wagen. J. Life Sci.* 54, 413-429.
- Bonny B.P., Prasad R.M., Narayan S.S., Varughese M. (2005) Participatory learning, experimentation, action and dissemination (PLEAD) - A model for farmer participatory technology evolution in agriculture, *Outlook Agric.* 34, 111-115.
- Bosma R.H., Bos M., Kante S., Kebe D., Quak W. (1999) The promising impact of ley introduction and herd expansion on soil organic matter content in southern Mali, *Agric. Syst.* 62, 1-15.
- Brown L., Scholefield D., Jewkes E.C., Lockyer D.R., del Prado A. (2005) NGAUGE: A decision support system to optimise N fertilisation of British grassland for economic and environmental goals, *Agric. Ecosyst. Environ.* 109, 20-39.
- Buyse J., Van Huylenbroeck G., Vanslembrouck I., Vanrolleghem P. (2005) Simulating the influence of management decisions on the nutrient balance of dairy farms, *Agric. Syst.* 86, 333-348.
- Cabrera V.E., Breuer N.E., Hildebrand P.E., Letson D. (2005) The dynamic North Florida dairy farm model: A user-friendly computerized tool for increasing profits while minimizing N leaching under varying climatic conditions, *Comput. Electron. Agric.* 49, 286-308.
- Cabrera V.E., Hildebrand P.E., Jones J.W., Letson D., de Vries A. (2006) An integrated North Florida dairy farm model to reduce environmental impacts under seasonal climate variability, *Agric. Ecosyst. Environ.* 113, 82-97.
- Cabrera V.E., Jagtap S.S., Hildebrand P.E. (2007) Strategies to limit (minimize) nitrogen leaching on dairy farms driven by seasonal climate forecasts, *Agric. Ecosyst. Environ.* 122, 479-489.
- Cacho O.J., Finlayson J.D., Bywater A.C. (1995) A simulation model of grazing sheep: II. Whole farm model, *Agric. Syst.* 48, 27-50.
- Carberry P.S., Hochman Z., McCown R.L., Dalglish N.P., Foale M.A., Poulton P.L., Hargreaves J.N.G., Hargreaves D.M.G., Cawthray S., Hillcoat N., Robertson M.J. (2002a) The FARMSCAPE approach to decision support: farmers', advisers', researchers' monitoring, simulation, communication and performance evaluation, *Agric. Syst.* 74, 141-177.
- Carberry P.S., Probert M.E., Dimes J.P., Keating B.A., McCown R.L. (2002b) Role of modelling in improving nutrient efficiency in cropping systems, *Plant Soil* 245, 193-203.
- Cardoso I.M., Guijt I., Franco F.S., Carvalho A.F., Neto P.S.F. (2001) Continual learning for agroforestry system design: university, NGO and farmer partnership in Minas Gerais, Brazil, *Agric. Syst.* 69, 235-257.
- Castelan-Ortega O.A., Fawcett R.H., Arriaga-Jordan C., Herrero M. (2003a) A decision support system for smallholder campesino maize-cattle production systems of the Toluca Valley in Central Mexico. Part I - Integrating biological and socio-economic models into a holistic system, *Agric. Syst.* 75, 1-21.
- Castelan-Ortega O.A., Fawcett R.H., Arriaga-Jordan C., Herrero M. (2003b) A decision support system for smallholder campesino maize-cattle production systems of the Toluca Valley in Central Mexico. Part II - Emulating the farming system, *Agric. Syst.* 75, 23-46.
- Chatelin M.H., Aubry C., Poussin J.C., Meynard J.M., Masse J., Verjux N., Gate P., Le Bris X. (2005) DeciBle, a software package for wheat crop management simulation, *Agric. Syst.* 83, 77-99.

- Coleno F.C., Duru M., Soler L.G. (2002) A simulation model of a dairy forage system to evaluate feeding management strategies with spring rotational grazing, *Grass Forage Sci.* 57, 312-321.
- Coquil X., Blouet A., Fiorelli J.L., Mignolet C., Bazard C., Foissy D., Trommenschlager J.M., Benoit M., Meynard J.M. (2007) Prototyping connected farming systems at a small territory scale, in: Donatelli M., Hatfield J., Rizzoli A. (Eds.), *Farming System Design 2007*, Int. Symposium on Methodologies on Integrated Analysis on Farm Production Systems. Catania (Italy), pp. 125-126.
- Cros M.J., Duru M., Garcia F., Martin-Clouaire R. (2001) Simulating rotational grazing management, *Environ. Int.* 27, 139-145.
- Cros M.J., Duru M., Garcia F., Martin-Clouaire R. (2003) A biophysical dairy farm model to evaluate rotational grazing management strategies, *Agronomie* 23, 105-122.
- de Buck A.J., Hendrix E.M.T., Schoorlemmer H.B. (1999) Analysing production and environmental risks in arable farming systems: A mathematical approach, *Eur. J. Oper. Res.* 119, 416-426.
- de Koeijer T.J., Wossink G.A.A., van Ittersum M.K., Struik P.C., Renkema J.A. (1999) A conceptual model for analysing input-output coefficients in arable farming systems: from diagnosis towards design, *Agric. Syst.* 61, 33-44.
- Defoer T., De Groote H., Hilhorst T., Kante S., Budelman A. (1998) Participatory action research and quantitative analysis for nutrient management in southern Mali. a fruitful marriage?, *Agric. Ecosyst. Environ.* 71, 215-228.
- Dobos R., McPhee M., Ashwood A., Alford A. (2001) A decision support tool for the feeding and management of dairy replacement heifers, *Environ. Modell. Softw.* 16, 331-338.
- Dobos R.C., Ashwood A.M., Moore K., Youman M. (2004) A decision tool to help in feed planning on dairy farms, *Environ. Modell. Softw.* 19, 967-974.
- Dogliotti S., Rossing W.A.H., van Ittersum M.K. (2004) Systematic design and evaluation of crop rotations enhancing soil conservation, soil fertility and farm income: a case study for vegetable farms in South Uruguay, *Agric. Syst.* 80, 277-302.
- Dogliotti S., van Ittersum M.K., Rossing W.A.H. (2005) A method for exploring sustainable development options at farm scale: a case study for vegetable farms in South Uruguay, *Agric. Syst.* 86, 29-51.
- Dogliotti S., van Ittersum M.K., Rossing W.A.H. (2006) Influence of farm resource endowment on possibilities for sustainable development: A case study for vegetable farms in South Uruguay, *J. Environ. Manage.* 78, 305-315.
- Donnelly J.R., Freer M., Salmon L., Moore A.D., Simpson R.J., Dove H., Bolger T.P. (2002) Evolution of the GRAZPLAN decision support tools and adoption by the grazing industry in temperate Australia, *Agric. Syst.* 74, 115-139.
- Dorward P., Galpin M., Shepherd D. (2003) Participatory Farm Management methods for assessing the suitability of potential innovations. A case study on green manuring options for tomato producers in Ghana, *Agric. Syst.* 75, 97-117.
- Dounias I., Aubry C., Capillon A. (2002) Decision-making processes for crop management on African farms. Modelling from a case study of cotton crops in northern Cameroon, *Agric. Syst.* 73, 233-260.
- Dowle K., Doyle C.J., Spedding A.W., Pollott G.E. (1988) A model for evaluating grassland management decisions on beef and sheep farms in the UK, *Agric. Syst.* 28, 299-317.
- Doyle C.J., Edwards C. (1986) A model for evaluating grassland management decisions on dairy farms in the UK, *Agric. Syst.* 21, 243-266.
- Duru M., Bergez J.E., Delaby L., Justes E., Theau J.P., Viegas J. (2007) A spreadsheet model for developing field indicators and grazing management tools to meet environmental and production targets for dairy farms, *J. Environ. Manage.* 82, 207-220.

- Duru M., Hubert B. (2003) Management of grazing systems: from decision and biophysical models to principles for action, *Agronomie* 23, 689-703.
- Ekman S. (2005) Cost-effective nitrogen leaching reduction as influenced by linkages between farm-level decisions, *Agric. Econ.* 32, 297-309.
- Flaten O., Lien G. (2007) Stochastic utility-efficient programming of organic dairy farms, *Eur. J. Oper. Res.* 181, 1574-1583.
- Foale M.A., Probert M.E., Carberry P.S., Lack D., Yeates S., Brimblecombe D., Shaw R., Crocker M. (2004) Participatory research in dryland cropping systems - monitoring and simulation of soil water and nitrogen in farmers' paddocks in Central Queensland, *Aust. J. Exp. Agric.* 44, 321-331.
- Gassman P.W., Osei E., Saleh A., Rodecap J., Norvell S., Williams J. (2006) Alternative practices for sediment and nutrient loss control on livestock farms in northeast Iowa, *Agric. Ecosyst. Environ.* 117, 135-144.
- Gibbons J.M., Sparkes D.L., Wilson P., Ramsden S.J. (2005) Modelling optimal strategies for decreasing nitrate loss with variation in weather - a farm-level approach, *Agric. Syst.* 83, 113-134.
- Groot J.C.J., Rossing W.A.H., Lantinga E.A. (2006) Evolution of farm management, nitrogen efficiency and economic performance on Dutch dairy farms reducing external inputs, *Livest. Sci.* 100, 99-110.
- Groot J.C.J., Rossing W.A.H., Lantinga E.A., Van Keulen H. (2003) Exploring the potential for improved internal nutrient cycling in dairy farming systems, using an eco-mathematical model, *Neth. J. Agric. Sci.* 51, 165-194.
- Guerrin F. (2001) MAGMA: a simulation model to help manage animal wastes at the farm level, *Comput. Electron. Agric.* 33, 35-54.
- Hagmann J., Chuma E. (2002) Enhancing the adaptive capacity of the resource users in natural resource management, *Agric. Syst.* 73, 23-39.
- Heard J.W., Cohen D.C., Doyle P.T., Wales W.J., Stockdale C.R. (2004) Diet Check - a tactical decision support tool for feeding decisions with grazing dairy cows, *Anim. Feed Sci. Technol.* 112, 177-194.
- Herrero M., Fawcett R.H., Dent J.B. (1999) Bio-economic evaluation of dairy farm management scenarios using integrated simulation and multiple-criteria models, *Agric. Syst.* 62, 169-188.
- Hilhorst G.J., Oenema J., van Keulen H. (2001) Nitrogen management on experimental dairy farm 'De Marke'; farming system, objectives and results, *Neth. J. Agric. Sci.* 49, 135-151.
- Hill S.B., Vincent C., Chouinard G. (1999) Evolving ecosystems approaches to fruit insect pest management, *Agric. Ecosyst. Environ.* 73, 107-110.
- Huth N.I., Carberry P.S., Poulton P.L., Brennan L.E., Keating B.A. (2002) A framework for simulating agroforestry options for the low rainfall areas of Australia using APSIM, *Eur. J. Agron.* 18, 171-185.
- Jordan V.W.L., Hutcheon J.A., Donaldson G.V., Farmer D.P. (1997) Research into and development of integrated farming systems for less-intensive arable crop production: experimental progress (1989-1994) and commercial implementation, *Agric. Ecosyst. Environ.* 64, 141-148.
- Kassie M., Jabbar M.A., Kassa B., Saleem M.A.M. (1999) Benefits of integration of cereals and forage legumes with and without crossbred cows in mixed farms: An *ex ante* analysis for highland Ethiopia, *J. Sustain. Agric.* 14, 31-48.
- Kerr D.V., Cowan R.T., Chaseling J. (1999) DAIRYPRO - a knowledge-based decision support system for strategic planning on sub-tropical dairy farms. I. System description, *Agric. Syst.* 59, 245-255.

- Labbé F., Ruelle P., Garin P., Leroy P. (2000) Modelling irrigation scheduling to analyse water management at farm level, during water shortages, *Eur. J. Agron.* 12, 55-67.
- Lewis K.A., Tzilivakis J. (2000) The role of the EMA software in integrated crop management and its commercial uptake, *Pest Manag. Sci.* 56, 969-973.
- Louhichi K., Alary V., Grimaud P. (2004) A dynamic model to analyse the bio-technical and socio-economic interactions in dairy farming systems on the Reunion Island, *Anim. Res.* 53, 363-382.
- Loyce C., Rellier J.P., Meynard J.M. (2002) Management planning for winter wheat with multiple objectives (1): The BETHA system, *Agric. Syst.* 72, 9-31.
- Madelrieux S., Dedieu B., Dobremez L. (2006) ATELAGE: modelling to qualify work organisation in livestock farming systems, *Prod. Anim.* 19, 47-57.
- Meot A., Hubert B., Lasseur J. (2003) Organisation of the pastoral territory and grazing management: joint modelling of grazing management practices and plant cover dynamics, *Agric. Syst.* 76, 115-139.
- Milne J., Sibbald A. (1998) Modelling of grazing systems at the farm level, *Ann. Zootech.* 47, 407-417.
- Modin-Edman A.-K., Oborn I., Sverdrup H. (2007) FARMFLOW--A dynamic model for phosphorus mass flow, simulating conventional and organic management of a Swedish dairy farm, *Agric. Syst.* 94, 431-444.
- Musshoff O., Hirschauer N. (2007) What benefits are to be derived from improved farm program planning approaches? The role of time series models and stochastic optimization, *Agric. Syst.* 95, 11-27.
- Navarrete M., Le Bail M. (2007) SALADPLAN: a model of the decision-making process in lettuce and endive cropping, *Agron. Sustain. Dev.* 27, 209-221.
- Oenema J., Koskamp G.J., Galama P.J. (2001) Guiding commercial pilot farms to bridge the gap between experimental and commercial dairy farms; the project 'Cows & Opportunities', *Neth. J. Agric. Sci.* 49, 277-296.
- Olesen J.E., Schelde K., Weiske A., Weisbjerg M.R., Asman W.A.H., Djurhuus J. (2006) Modelling greenhouse gas emissions from European conventional and organic dairy farms, *Agriculture Ecosystems & Environment* 112, 207-220.
- Penot E., Feintrenie L. (2005) Risk assessment, market uncertainties and diversification strategies for rubber farmers: comparison between Indonesia and Cambodia using farming systems modelling, in: Dixon J., Neely C., Lightfoot C., Avila M., Baker D., Holding C., King C. (Eds.), *Farming Systems and Poverty: Making a Difference*, Proceedings of the 18th International Symposium of the International Farming Systems Association: A Global Learning Opportunity. IFSA, Rome, Italy, pp. 168-177.
- Pfister F., Bader H.P., Scheidegger R., Baccini P. (2005) Dynamic modelling of resource management for farming systems, *Agric. Syst.* 86, 1-28.
- Recio B., Rubio F., Criado J.A. (2003) A decision support system for farm planning using AgriSupport II, *Decis. Support Syst.* 36, 189-203.
- Robertson D., Wang Q.J. (2004) Bayesian networks for decision analyses - an application to irrigation system selection, *Aust. J. Exp. Agric.* 44, 145-150.
- Robertson M.J., Carberry P.S., Lucy M. (2000) Evaluation of a new cropping option using a participatory approach with on-farm monitoring and simulation: a case study of spring-sown mungbeans, *Aust. J. Agric. Res.* 51, 1-12.
- Romera A.J., Morris S.T., Hodgson J., Stirling W.D., Woodward S.J.R. (2004) A model for simulating rule-based management of cow-calf systems, *Comput. Electron. Agric.* 42, 67-86.

- Rossing W.A.H., Jansma J.E., De Ruijter F.J., Schans J. (1997) Operationalizing sustainability: exploring options for environmentally friendly flower bulb production systems, *European Journal of Plant Pathology* 103, 217-234.
- Rotz C.A., Oenema J., van Keulen H. (2006) Whole farm management to reduce nutrient losses from dairy farms: A simulation study, *Appl. Eng. Agric.* 22, 773-784.
- Rotz C.A., Satter L.D., Mertens D.R., Muck R.E. (1999) Feeding strategy, nitrogen cycling, and profitability of dairy farms, *J. Dairy Sci.* 82, 2841-2855.
- Rowe E.C., van Wijk M.T., de Ridder N., Giller K.E. (2006) Nutrient allocation strategies across a simplified heterogeneous African smallholder farm, *Agric. Ecosyst. Environ.* 116, 60-71.
- Sadras V., Roget D., Krause M. (2003) Dynamic cropping strategies for risk management in dry-land farming systems, *Agric. Syst.* 76, 929-948.
- Sanchez-Giron V., Serrano A., Suarez M., Hernanz J.L., Navarrete L. (2007) Economics of reduced tillage for cereal and legume production on rainfed farm enterprises of different sizes in semiarid conditions, *Soil Tillage Res.* 95, 149-160.
- Savory A., Butterfield J. (1999) *Holistic Management - an new framework for decision making*, Island Press,
- Schiere J.B., De Wit J., Steenstra F.A., Van Keulen H. (1999) Design of farming systems for low input conditions: principles and implications based on scenario studies with feed allocation in livestock production, *Neth. J. Agric. Sci.* 47, 169-183.
- Schils R.L.M., de Haan M.H.A., Hemmer J.G.A., van den Pol-van Dasselaar A., De Boer J.A., Evers A.G., Holshof G., van Middelkoop J.C., Zom R.L.G. (2007) DairyWise, a whole-farm dairy model, *J. Dairy Sci.* 90, 5334-5346.
- Schils R.L.M., Verhagen A., Aarts H.F.M., Sebek L.B.J. (2005) A farm level approach to define successful mitigation strategies for GHG emissions from ruminant livestock systems, *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 71, 163-175.
- Seppelt R. (1999) Applications of optimum control theory to agroecosystem modelling, *Ecol. Model.* 121, 161-183.
- Shalloo L., Dillon P., Rath M., Wallace M. (2004) Description and validation of the Moorepark Dairy System Model, *J. Dairy Sci.* 87, 1945-1959.
- Sharifi M.A., Van Keulen H. (1994) A decision support system for land use planning at farm enterprise level, *Agric. Syst.* 45, 239-257.
- Snow V.O., Lovatt S.J. (2008) A general planner for agro-ecosystem models, *Comput. Electron. Agric.* 60, 201-211.
- Sorensen C.G., Madsen N.A., Jacobsen B.H. (2005) Organic farming scenarios: Operational analysis and costs of implementing innovative technologies, *Biosyst. Eng.* 91, 127-137.
- Stilma E.S.C., Vosman B., Korevaar H., Rijswijk M., Smit A.B., Struik P.C. (2007) Designing biodiverse arable production systems for the Netherlands by involving various stakeholders, *NJAS-Wagen. J. Life Sci.* 55, 1-20.
- Stonehouse D.P., de Vos G.W., Weersink A. (2002) Livestock manure systems for swine finishing enterprises, *Agric. Syst.* 73, 279-296.
- Stoorvogel J.J., Bouma J., Orlich R.A. (2004) Participatory Research for Systems Analysis: Prototyping for a Costa Rican Banana Plantation, *Agron J* 96, 323-336.
- Tixier P., Malézieux E., Dorel M., Wery J. (2008) SIMBA, a model for designing sustainable banana-based cropping systems, *Agric. Syst.* In Press, Corrected Proof,
- Torkamani J. (2005) Using a whole-farm modelling approach to assess prospective technologies under uncertainty, *Agric. Syst.* 85, 138-154.
- Val-Arreola D., Kebreab E., France J. (2006) Modeling small-scale dairy farms in central Mexico using multi-criteria programming, *J. Dairy Sci.* 89, 1662-1672.

- Val-Arreola D., Kebreab E., Mills J.A.N., France J. (2005) Analysis of feeding strategies for small-scale dairy systems in central Mexico using linear programming, *J. Anim. Feed Sci.* 14, 607-624.
- Val-Arreola D., Kebreab E., Mills J.A.N., Wiggins S.L., France J. (2004) Forage production and nutrient availability in small-scale dairy systems in central Mexico using linear programming and partial budgeting, *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 69, 191-201.
- van de Ven G.W.J., de Ridder N., van Keulen H., van Ittersum M.K. (2003) Concepts in production ecology for analysis and design of animal and plant-animal production systems, *Agric. Syst.* 76, 507-525.
- van de Ven G.W.J., van Keulen H. (2007) A mathematical approach to comparing environmental and economic goals in dairy farming: Identifying strategic development options, *Agric. Syst.* 94, 231-246.
- Vayssières J., Bocquier F., Lecomte P. (2008) Interactive simulation of various management strategies, *Agric. Syst.* submitted,
- Vayssieres J., Lecomte P., Guerrin F., Nidumolu U.B. (2007) Modelling farmers' action: decision rules capture methodology and formalisation structure: a case of biomass flow operations in dairy farms of a tropical island, *Animal* 1, 716-733.
- Vereijken P. (1997) A methodical way of prototyping integrated and ecological arable farming systems (I/EAFS) in interaction with pilot farms, *Eur. J. Agron.* 7, 235-250.
- Veysset P., Bebin D., Lherm M. (2005) Adaptation to Agenda 2000 (CAP reform) and optimisation of the farming system of French suckler cattle farms in the Charolais area: a model-based study, *Agric. Syst.* 83, 179-202.
- Waithaka M.M., Thornton P.K., Herrero M., Shepherd K.D. (2006) Bio-economic evaluation of farmers' perceptions of viable farms in western Kenya, *Agric. Syst.* 90, 243-271.
- Weiske A., Vabitsch A., Olesen J.E., Schelde K., Michel J., Friedrich R., Kaltschmitt M. (2006) Mitigation of greenhouse gas emissions in European conventional and organic dairy farming, *Agric. Ecosyst. Environ.* 112, 221-232.
- White D.S., Labarta R.A., Leguia E.J. (2005) Technology adoption by resource-poor farmers: considering the implications of peak-season labor costs, *Agric. Syst.* 85, 183-201.
- Yiridoe E.K., Langyintuo A.S., Dogbe W. (2006) Economics of the impact of alternative rice cropping systems on subsistence farming: Whole-farm analysis in northern Ghana, *Agric. Syst.* 91, 102-121.
- Zhong J., Hengsdijk H., van Keulen H., Shi Q., Zhao X. (2004) A methodology to explore options for rice-based farming systems in a humid subtropical region: a case study for Jiangxi, China, in: Fischer T., Turner N., Angus J., McIntyre L., Robertson M., Borrell A., Lloyd D. (Eds.), 4th International Crop Science Congress - New directions for a diverse planet. The Regional Institute Ltd, Australia, Brisbane, Australia.

Références citées dans le rapport (autres que celles de la base « Design-cas »)

- Attonaty J.M., Chatelin M.H., Garcia F. (1999) Interactive simulation modeling in farm decision-making, *Comput. Electron. Agric.* 22, 157-170.
- Ahuja L.R., Andales A.A., Ma L., Saseendran S.A. (2007) Whole-system integration and modeling essential to agricultural science and technology for the 21st century, *Journal of Crop Improvement* 19, 73-103.
- Andrieu N. (2004) Diversité du territoire de l'exploitation d'élevage et sensibilité du système fourrager aux aléas climatiques : étude empirique et modélisation. Ph. D. thesis, Institut National Agronomique Paris-Grignon, pp. 314.
- Aubry C. (2007) La gestion technique des exploitations agricoles - composante de la théorie agronomique. HDR, INPT, pp. 101.
- Bellon S., Bockstaller C., Fauriel J., Geniaux G., Lamine C. (2007) To design or to redesign: how can indicators contribute?, in: Donatelli M., Hatfield J., Rizzoli A. (Eds.), *Farming System Design 2007, Int. Symposium on Methodologies on Integrated Analysis on Farm Production Systems*. Catania (Italy), pp. 137-138.
- Boiffin J., Hubert B., Durand N. (2004) Agriculture et Développement Durable. Enjeux et questions de recherche. in: INRA (Eds.), pp. 91.
- Bousquet F., Castella J.C., Trebil G., Barnaud C., Boissau S., Kam S.P. (2007) Using multi-agent systems in a companion modelling approach for agro-ecosystem management in South-east Asia, *Outlook Agric.* 36, 57-62.
- Cros M.J., Garcia F., Martin-Clouaire R., Rellier J.P. (2006) 3.1 Modeling and Simulation, in: Munack A. (Eds.), *CIGR Handbook of Agricultural Engineering*. ASABE, St. Joseph, Michigan, USA, pp. 109-124.
- Dalgaard T., Hutchings N.J., Porter J.R. (2003) Agroecology, scaling and interdisciplinarity, *Agriculture, Ecosystems & Environment* 100, 39-51.
- Dogliotti S. (2003) Exploring options for sustainable development of vegetable farms in South Uruguay. Ph. D. thesis, Wageningen University, pp. 145.
- Dogliotti S., Rossing W.A.H., van Ittersum M.K. (2003) ROTAT, a tool for systematically generating crop rotations, *Eur. J. Agron.* 19, 239-250.
- Dugué P., Mathieu B., Sibelet N., Seugé C., Vall E., Cathala M., Olina J.-P. (2006) Les paysans innovent, que font les agronomes ? Le cas des systèmes de culture en zone cotonnière du Cameroun, in: (Eds.), *Agronomes et innovations : 3ème édition des entretiens du Pradel. Actes du colloque des 8-10 septembre 2004*. - Paris : L'Harmattan. pp. p. 103-122.
- Gliessman S.R. (2006) *Agroecology - the ecology of sustainable food systems*, CRC Press.
- Guerrin F. (2007) Représentation des connaissances pour la décision et pour l'action. HDR, Université de la Réunion, pp. 155.
- Hatchuel A., Le Masson P., Weil B. (2006) Les processus d'innovation. Conception innovante et croissance des entreprises, Hermès, Paris, 472 pp.
- Hill S.B. (2006) Enabling redesign for deep industrial ecology and personal values transformation: a social ecology perspective, in: Green K., Randles S. (Eds.), *Industrial ecology and spaces of innovation*. Edward Elgar Publishing, pp. 255-271.
- INRA (2005). La modélisation à l'INRA, 60 p,
http://www.inra.fr/internet/Projets/agroBI/Rapport_Modelisation_2005_INRA.pdf
- Janssen S., van Ittersum M.K. (2007) Assessing farm innovations and responses to policies: A review of bio-economic farm models, *Agric. Syst.* 94, 622-636.
- Jouven M. (2006) Quels équilibres entre production animale et utilisation durable des prairies dans les systèmes bovins allaitants herbagers? Une approche par modélisation des interactions conduite-troupeau-ressources. Ph. D. thesis, INAPG, pp. 271.

- Kabourakis E., Vassiliou A. (1999) Designing and disseminating ecological production systems for perennials a first step for developing sustainable organic farming systems for the mediterranean, in: Zanolli R., Krell R. (Eds.), *Research Methodologies in Organic Farming*. FAO, Frick, Switzerland.
- Keating B.A., McCown R.L. (2001) Advances in farming systems analysis and intervention, *Agric. Syst.* 70, 555-579.
- Lancon J., Wery J., Rapidel B., Angokaye M., Gerardeaux E., Gaborel C., Ballo D., Fadegnon B. (2007) An improved methodology for integrated crop management systems, *Agron. Sustain. Dev.* 27, 101-110.
- Langeveld J.W.A., van Keulen H., de Haan J.J., Kroonen-Backbier B.M.A., Oenema J. (2005) The nucleus and pilot farm research approach: experiences from The Netherlands, *Agric. Syst.* 84, 227-252.
- Le Gal P.-Y., Moulin C.-H., Navarette M., Wery J. (2007) A modelling framework to design innovative agricultural production systems, in: Donatelli M., Hatfield J., Rizzoli A. (Eds.), *Farming System Design 2007, Int. Symposium on Methodologies on Integrated Analysis on Farm Production Systems*. Catania (Italy), pp. 64-65.
- Le Gal P.-Y., Merot A., Moulin C.-H., Navarette M., Wery J. (soumis) A modelling framework to support farmers in designing innovative agricultural production systems, *Environ. Modell. Softw.*
- Loyce C., Wery J. (2006) Les outils des agronomes pour l'évaluation et la conception des systèmes de culture, in: Doré T., Le Bail M., Martin P., Ney B., Roger-Estrade J. (Eds.), *L'agronomie aujourd'hui*. QUAE Editions, pp. 77-95.
- Meynard J.M., Aggeri F., Coulon J.-B., Habib R., Tillon J.-P. (2006) Recherches sur la conception de systèmes agricoles innovants. in: INRA (Eds.), pp. 57.
- McCown R.L., Hammer G.L., Hargreaves J.N.G., Holzworth D.P., Freebairn D.M. (1996) APSIM: a novel software system for model development, model testing and simulation in agricultural systems research, *Agricultural Systems* 50, 255-271.
- McCown R.L., Hochman Z., Carberry P.S. (2002) Probing the enigma of the decision support system for farmers: Learning from experience and from theory, *Agric. Syst.* 74, 1-10.
- Olesen J.E., Schelde K., Weiske A., Weisbjerg M.R., Asman W.A.H., Djurhuus J. (2006) Modelling greenhouse gas emissions from European conventional and organic dairy farms, *Agric. Ecosyst. Environ.* 112, 207-220.
- Papy F. (2004) Comment l'agronomie participe au processus d'innovation, in: Académie d'Agriculture de France, *Les entretiens du Pradel "Agronomes et Innovations"*, Paris, 8-10 septembre 2004.
- Penot E., Le Bars M., Deheuvels O., Le Grusse P., Attonaty J.M. (2004) Farming systems modelling in tropical agriculture using the software "Olympe", in: Bayar A. (Eds.), *ECOMOD, Policy modelling international conference*. Paris.
- Rossing W.A.H., Zander P., Josien E., Groot J.C.J., Meyer B.C., Knierim A. (2007) Integrative modelling approaches for analysis of impact of multifunctional agriculture: A review for France, Germany and The Netherlands, *Agric. Ecosyst. Environ.* 120, 41-57.
- Schils R.L.M., Olesen J.E., del Prado A., Soussana J.F. (2007b) A review of farm level modelling approaches for mitigating greenhouse gas emissions from ruminant livestock systems, *Livest. Sci.* 112, 240-251.
- Schumpeter J.A. (1934) *The theory of economic development*, Harward University Press, Cambridge, R. Optie (transl.).
- Sébillotte M., Soler L.G. (1988) Le concept de modèle général et la compréhension du comportement de l'agriculteur, *C.R. Académie d'Agriculture Française* 74, 50-70.

- Sterk B., van Ittersum M.K., Leeuwis C., Rossing W.A.H., van Keulen H., van de Ven G.W.J. (2006) Finding niches for whole-farm design models - contradictio in terminis?, *Agric. Syst.* 87, 211-228.
- Sterk B. (2007) A window of opportunities - The contributions of land use modelling to societal learning. Ph. D. thesis, Wageningen University, pp. 136.
- ten Berge H.F.M., van Ittersum M.K., Rossing W.A.H., van de Ven G.W.J., Schans J., van de Sanden P. (2000) Farming options for The Netherlands explored by multi-objective modelling, *Eur. J. Agron.* 13, 263-277.
- Thornton P.K., Herrero M. (2001) Integrated crop-livestock simulation models for scenario analysis and impact assessment, *Agric. Syst.* 70, 581-602.
- Tixier P. (2004) Conception assistée par modèle de systèmes de culture durables: application aux systèmes bananiers de Guadeloupe. Ph. D. thesis, ENSAM, pp. 237.
- van Dijk G., van Boekel P. (2001) Governance of innovation in animal production: new roles for science, business and the public sector, *Livestock Production Science* 72, 9-23.
- van Keulen H., Aarts H.F.M., Habekotte B., van der Meer H.G., Spiertz J.H.J. (2000) Soil-plant-animal relations in nutrient cycling: the case of dairy farming system 'De Marke', *European Journal of Agronomy* 13, 245-261.
- Vayssieres J. (2008) Modélisation participative et intégration des pratiques décisionnelles d'éleveurs dans un modèle global d'exploitation - application à l'évaluation de la durabilité des élevages laitiers d'une île tropicale. Thèse, Montpellier SupAgro, pp. 166+annexes.
- Vereijken P. (1999) Manual for prototyping integrated and ecological arable farming systems (I/EAFS) in interaction with pilot farms. in: (Eds.), *Plant Research International*, Wageningen, pp. 53.

ANNEXES

ANNEXE 1 : traitement des références sous EndNote

Dans le logiciel EndNote, afin de faciliter l'analyse des références, 6 champs ont été personnalisés (« custom »), et renseignés avec les mots clé suivants ((voir explication dans le texte):

Custom 1 = « statut de la référence » : archivé, internet (article sur internet, cf lien), PC, classer (article présent dans les classeurs de biblio), cas, lu, parcouru

Custom 2 = « niveau de décision de l'exploitant » : stratégique (>année), tactique (<année, saison), opérationnel (jour)

Custom 3 = « participation des acteurs » : nul, faible, fort, avant, pendant, après

Custom 4 = « type de modélisation » : conceptuelle, informatique, nulle, simulation, optimisation, optimisateur, règle, plan, atelier, biophysique, technique, décision, économique, tableur, statique, dynamique, empirique, mécaniste, développement, recherche, exploitation, SPA, sole, parcelle, troupeau, jour, semaine, mois, trimestre, saison, année

Custom 5 = « public visé » : conseiller, agriculteur, chercheur, politique

Custom 6 = « domaine » : organisation du travail, gestion de l'irrigation, conduite d'une culture, conduite de l'élevage, gestion des nutriments, conduite du système fourrager, orientation de l'exploitation, développement durable, environnement, risque, agroforesterie, fertilité

Par ailleurs, dans le champ correspondant aux mots clé, ont été ajoutés les termes suivants :

- expérimentation, modélisation, apprentissage : pour indiquer le type d'outil
- évaluation, *ex ante*, *ex post*, processus : pour indiquer le type de préoccupation
- methodology, rationale ou review : pour les articles de synthèse

Enfin, les pays des auteurs ont été renseignés dans le champ correspondant à l'adresse de l'auteur.

Les références traitées dans l'analyse bibliographiques sont dans la base « design_cas ». Les références non traitées ont été transférées dans les bases de données suivantes :

- Design : elle comporte à la fois les études de cas et des articles de synthèse dans notre domaine d'étude
- Model : base contenant des études utilisant des modèles, mais écartées de la base design
- Adoption : base contenant des études sur les raisons de la non adoption de modèles ou d'outils d'aide à la décision
- Vrac_design : toutes sortes d'études, provenant de la base initiale aux 668 références et non transférées vers les autres bases
- Designb : base initiale aux 668 références.

ANNEXE 2 : liste des revues internationales (base de données Design_cas)

Agricultural Economics : 1
Agricultural Systems : 43
Agriculture, Ecosystems & Environment : 10
Agronomy Journal : 1
Agronomy for Sustainable Development : 1
Animal : 1
Animal Feed Science and Technology : 1
Animal Research : 1
Applied Engineering in Agriculture : 1
Biosystems Engineering : 1
Computers and Electronics in Agriculture : 6
Decision Support Systems : 1
Ecological Modelling : 2
Environment International : 2
Environmental Modelling & Software : 2
European Journal of Agronomy : 3
European Journal of Operational Research : 2
European Journal of Plant Pathology : 1
Grass and Forage Science : 1
Irrigation Science : 1
Journal of Animal and Feed Sciences : 1
Journal of Dairy Science : 4
Journal of Environmental Management : 2
Journal of Sustainable Agriculture : 2
Livestock Science : 1
Nutrient Cycling in Agroecosystems : 4
Outlook on Agriculture : 1
Pest Management Science : 1
Plant and Soil : 1
Rangeland Ecology & Management : 1
Soil & Tillage Research : 1

ANNEXE 3 : liste des revues nationales (base de données Design_cas)

Agronomie : 2
Annales de Zootechnie : 1
Australian Journal of Agricultural Research : 1
Australian Journal of Experimental Agriculture : 2
Netherlands Journal of Agricultural Science : 4
Njas-Wageningen Journal of Life Sciences : 2
Productions Animales : 1
Transactions of the Asabe : 1

ANNEXE 4 : liste des références publiées dans des congrès

1991 : Congrès Européen des Economistes Agricoles : Economics and artificial intelligence in agriculture

Attonaty J.M., Maxime F., Soler L.G. (1991) Aid for strategic management of farms : a proposed knowledge based simulation model, in: EAAE E.A.O.A.E. (Eds.), Congrès Européen des Economistes Agricoles : Economics and artificial intelligence in agriculture. Bruxelles (BEL), pp. 10.

2004 : 4th International Crop Science Congress - New directions for a diverse planet

Zhong J., Hengsdijk H., van Keulen H., Shi Q., Zhao X. (2004) A methodology to explore options for rice-based farming systems in a humid subtropical region: a case study for Jiangxi, China, in: Fischer T., Turner N., Angus J., McIntyre L., Robertson M., Borrell A., Lloyd D. (Eds.), 4th International Crop Science Congress - New directions for a diverse planet. The Regional Institute Ltd, Australia, Brisbane, Australia.

2005 : 18th International Symposium of the International Farming Systems Association: A Global Learning Opportunity.

Penot E., Feintrenie L. (2005) Risk assessment, market uncertainties and diversification strategies for rubber farmers: comparison between Indonesia and Cambodia using farming systems modelling, in: Dixon J., Neely C., Lightfoot C., Avila M., Baker D., Holding C., King C. (Eds.), Farming Systems and Poverty: Making a Difference, Proceedings of the 18th International Symposium of the International Farming Systems Association: A Global Learning Opportunity. IFSA, Rome, Italy, pp. 168-177.

2005 : 6è congrès international de génie industriel

Abt V., Pierreval H., Vigier F., Bigeon J.B., Durand C. (2005) Modélisation d'entreprise et secteur agricole : modélisation d'une exploitation d'élevage, in: 6è congrès international de génie industriel, Besançon (France), pp. 9.

2007 : Farming System Design 2007, Int. Symposium on Methodologies on Integrated Analysis on Farm Production Systems (6)

Blazy J.M., Carpentier A., Ozier-Lafontaine H., Thomas A., Tixier P., Wery J. (2007) Integrated *ex ante* assessment of agro-management innovations by combining crop, farm and adoption models, in: Donatelli M., Hatfield J., Rizzoli A. (Eds.), Farming System Design 2007, Int. Symposium on Methodologies on Integrated Analysis on Farm Production Systems. Catania (Italy), pp. 17-18.

Coquil X., Blouet A., Fiorelli J.L., Mignolet C., Bazard C., Foissy D., Trommenschlager J.M., Benoit M., Meynard J.M. (2007) Prototyping connected farming systems at a small territory scale, in: Donatelli M., Hatfield J., Rizzoli A. (Eds.), Farming System Design 2007, Int. Symposium on Methodologies on Integrated Analysis on Farm Production Systems. Catania (Italy), pp. 125-126.

ANNEXE 5 : méthode holistique HOLISTIC (RESOURCE) MANAGEMENT

Nom de la méthode : gestion holistique (des ressources) - Holistic (resource) management

Auteurs : Savory A. (1988, 1999)

Objectif(s) : concevoir des systèmes agricoles durables (prenant en compte les 3 aspects, environnemental, économique et social) en utilisant au mieux les ressources naturelles.

Principe de la méthode : imiter les relations existant dans les écosystèmes.

La première étape consiste à définir un **objectif** qui prenne en compte les aspirations et les obligations de tous ceux qui seront impliqués dans le projet (Savory, 1999). Pour définir cet objectif, qualifié d'holistique, les décideurs doivent répondre à des questions « existentielles » (comme par exemple : pourquoi suis-je agriculteur, quel monde futur je souhaite ?). L'objectif holistique prend en compte la qualité de vie recherchée par toutes les parties prenantes, ce qui doit être produit pour atteindre cette qualité de vie, et les ressources dont les parties prenantes (et les générations futures) dépendent. Par la suite, chaque décision importante sera évaluée par rapport à cet objectif holistique.

En deuxième lieu, un **planning (bilan ?) financier** (financial planning) « holistique » (prenant en compte des objectifs environnementaux et sociaux) est établi. Puis il s'agit d'imiter ce qui se passe dans un écosystème, au niveau du cycle de l'eau (meilleure gestion de l'eau par une meilleure gestion du sol et des plantes), des êtres vivants (biodiversité), des minéraux (cycles biogéochimiques) et de l'énergie (augmenter les périodes ou les surfaces de photosynthèse à partir d'une meilleure gestion des cultures). Pour cela Savory préconise l'utilisation de différents « **outils** » : jachère, gestion du pâturage avec un planning en fonction de la végétation et de l'aridité du milieu, amélioration de la fertilité du sol, successions culturales diversifiées et avec intercultures, préservation d'espaces naturels pour les auxiliaires de culture... L'argent, le travail et la créativité sont également considérés comme des outils. Enfin la stratégie choisie est évaluée (au niveau économique, environnemental et social). Pour cela, lors de chaque prise de décision, l'agriculteur doit répondre à une série de questions simples qui lui permettront de connaître les effets de sa décision sur tout le système et de s'assurer que cette décision sera judicieuse du point de vue environnemental, économique et social. Si la décision a un effet prévu sur l'environnement, on considère de prime abord que cet effet sera négatif et on cherche ensuite à l'évaluer le plus tôt possible au moyen d'indicateurs.

Type d'innovation apportée : nouvelle façon de produire + nouvelle façon de s'organiser dans l'exploitation

Echelle(s) d'application prévue(s) : système de production ou agro-écosystème (mais plutôt orienté milieux arides)

Prise en compte des relations entre l'exploitation et son environnement naturel : oui (tout l'écosystème et le paysage)

Outils à utiliser : Cette méthode semble très conceptuelle; pas d'application informatique (sauf 2 feuilles Excel pour calculer le chargement optimal ou le planning de pâturage)

Personnes à impliquer : agriculteurs, leur famille et les ouvriers agricoles

Exemples d'application

Plusieurs exemples sont décrits dans les livres de Savory (1988, 1999) et dans l'article de l'ATTRA (Sullivan, 2001).

- **Référence biblio :** Sullivan (2001)
- **Objet d'étude :** système d'élevage de bovins
- **Objectif :** promouvoir la vie et faire des bénéfices
- **Type d'innovation :** ne plus utiliser d'insecticides
- **Outils utilisés :** diagnostic ; planning de pâturage
- **Participants à la démarche de conception :** les éleveurs
- **Degré de participation des acteurs :** les éleveurs conçoivent leur système (après avoir suivi une formation sur la « méthode Savory »)
- **Résultat :** tout le système de production a été modifié suite à l'arrêt de l'utilisation d'insecticides
- **Conclusions :** la méthode a été efficace vis-à-vis des objectifs recherchés.

Références

<http://www.holisticmanagement.org/index.html>

Savory A. (1989) A solution to desertification: holistic resource management. in: (Eds.), UK, pp. 13.

Savory A., Butterfield J. (1999) Holistic Management - an new framework for decision making, Island Press.

Sullivan P. (2001) Holistic management: a whole-farm decision making framework, Fundamentals of sustainable agriculture, <http://www.attra.org/attrapub/PDF/holistic.pdf>

Dr. Sandra NOVAK

Consultante en agronomie/ environnement
SOLPHY

La Grennery
73670 ENTREMONT-LE-VIEUX
Tél. : 04 79 26 25 95
solphy@gmail.com

Domaines d'expertise

Agronomie : qualité des sols, agriculture biologique, systèmes innovants

Environnement : transferts de polluants dans les sol, émissions de gaz à effet de serre

Champs d'activité

Veille scientifique : recherche bibliographique internationale, analyse et synthèse de publications

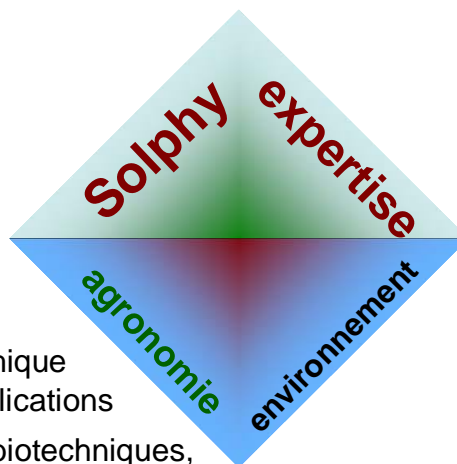
Modélisation : paramétrage de modèles biotechniques, simulation de systèmes de production

Expérimentation : conception d'études expérimentales

Communication : réalisation d'outils d'aide à la décision, rédaction d'articles scientifiques et de vulgarisation, présentation orale

Ingénierie de projet : mise en place des partenariats, animation du projet, communication des résultats

Formation : sciences du sol, modélisation agronomique, impacts environnementaux des systèmes agricoles, méthodes de mesure des polluants (eau, sol, air)



Exemples de réalisations

Élaboration d'outils d'aide à la décision à partir de modèles agronomiques :

- pour limiter les risque de pertes en nitrate
- pour estimer le potentiel herbager des prairies en élevage allaitant

Revues bibliographiques internationales sur :

- les indicateurs de la fertilité des sols
- les émissions de gaz à effet de serre en agriculture biologique
- les transferts de pesticides vers les eaux
- la conception de systèmes de production innovants

Études expérimentales :

- suivi et modélisation du transfert de pesticides en conditions contrôlées et au champ
- caractérisation des propriétés des sols

Partenaires et commanditaires

Recherche : CIRAD Montpellier, CNRS Nancy, ENSAIA, ENESAD, INRA Avignon, INRA Mirecourt, INRA Nancy, INRS-Eau Québec, Université d'Avignon, Université Nancy I

Développement : Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée & Corse, Chambres d'Agriculture de Saône-et-Loire et de Lorraine